

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

KOSTEL NA LESNÉ

THE CHURCH IN LESNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VOJTĚCH POSPÍŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETRA BERKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2017




# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3608T001 Pozemní stavby
PRACOVISŤE	Ústav pozemního stavitelství

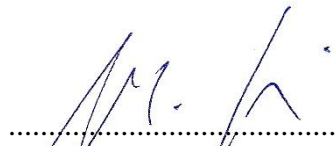
## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Vojtěch Pospíšil
NÁZEV	Kostel na Lesné
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Petra Berková, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

  
prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.  
Vedoucí ústavu



  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

(1) Směrnice děkana č. 19/2011 s dodatkem a přílohami; (2) Katalogy a odborná literatura; (3) Stavební zákon č. 183/2006 Sb. ve znění zákona č. 350/2012 Sb.; (4) Vyhláška č. 499/2006 Sb. ve znění vyhlášky č. 62/2013 Sb.; (5) Vyhláška č. 268/2009 Sb.; (6) Vyhláška č. 398/2009 Sb.; (7) Platné normy ČSN, EN; (8) Studie dispozičního řešení stavby; (9) NV 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, platné ČSN.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Zadání VŠKP: Analýza hlukové zátěže okolní zástavby kostela od kostelních zvonů, optimalizace interiéru kostela z hlediska akustické pohody.

Cíl práce: Vytvoření hlukové studie pro okolní zástavbu kostela pro hluk z kostelních zvonů. Optimalizace skladby konstrukcí a jejich úprav z hlediska prostorové akustiky kostela. Textová i výkresová část bude zpracována s využitím výpočetní techniky.

Výkresy budou opatřeny jednotným popisovým polem a k obhajobě budou předloženy složené do desek z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým písmem. Dílčí složky formátu A4 budou opatřeny popisovým polem s uvedením seznamu příloh na vnitřní straně složky.

Požadované výstupy dle uvedené Směrnice:

Textová část VŠKP bude obsahovat kromě ostatních položek také položku h) Úvod (popis námětu na zadání VŠKP), položku i)

Vlastní text práce (textová část projektové dokumentace dle vyhlášky č. 499/2006 Sb. ve znění vyhlášky 62/2013 Sb.) a položku j)

Závěr (zhodnocení obsahu VŠKP, soulad se zadáním, změny oproti původní studii).

Příloha textové části VŠKP bude obsahovat výkresovou dokumentaci podle pokynů vedoucí práce.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Petra Berková, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt**

Tato teoretická diplomová práce se zabývá prostorovou akustikou a s tím úzce spojenou problematikou doby dozvuku. Součástí práce je zpracování návrhu akustických úprav kostela na základě ručního výpočtu, který byl dále upravován ve specializovaném softwaru Odeon Room Acoustics Program.

Pro okolní zástavbu kostela byla vytvořena hluková studie v programu Hluk+, aby bylo posouzeno, jaký bude mít tato novostavba hlukový dopad z kostelních zvonů dopad na své okolí.

Na základě specializace, bylo vytvořeno několik návrhů pro konstrukční řešení kostela. A to přibližný návrh dvouplošné kupole, systém odvodnění spojovacího krčku a způsoby ukotvení pevného velkoformátového okenního zasklení.

Výsledkem práce je vhodný návrh stavebně akustických úprav a zlepšení poslechových kvalit pro budoucí stavbu tohoto kostela.

**Klíčová slova**

Prostorová akustika, doba dozvuku, Hluk+, kostel, novostavba, Odeon Room Acoustics Program, Brno, Lesná

**Abstract**

This theoretical diploma thesis deals with room acoustics and the closely related issue of reverberation. Part of the work is a drafting of acoustic modifications of the church based on manual calculation, which was further modified in a specialized software Odeon Room Acoustics Program.

For the surrounding buildings of the church was created a study of the noise in a program Hluk+ in order to assess what will be the noise impact of this new building on its surroundings.

On the basis of specialization was created several proposals for the design of the church. The approximate proposal of the double-plated dome, a system of drainage of the coupling neck, and the ways the anchor of the hard large-format window glazing.

The result of the work is suitable design of acoustic adjustments and improvement of the listening qualities for the future construction of this church.

**Keywords**

Room acoustics, reverberation time, Hluk+, church, new building, Odeon Room Acoustics Program, Brno, Lesná



### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Vojtěch Pospíšil *Kostel na Lesné*. Brno, 2016. 106 s., 102 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Petra Berková, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2017



---

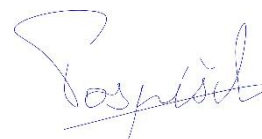
Bc. Vojtěch Pospíšil  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

### Prohlášení

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12.1. 2017



---

Bc. Vojtěch Pospíšil  
autor práce

**Poděkování**

Rád bych poděkoval svým rodičům a sourozencům, kteří mě velmi podporovali po celou dobu studia a finančně mi umožnili studovat na Stavební fakultě VUT. A nakonec bych rád poděkoval paní Ing. Petře Berkové, Ph.D. za vstřícnost a pomoc při práci a konzultacích, za cenné rady a trpělivost při zpracování mé diplomové práce.



## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

**Vedoucí práce** Ing. Petra Berková, Ph.D.

**Autor práce** Bc. Vojtěch Pospíšil

**Škola** Vysoké učení technické v Brně

**Fakulta** Stavební

**Ústav** Ústav pozemního stavitelství

**Studijní obor** 3608T001 Pozemní stavby

**Studijní program** N3607 Stavební inženýrství

**Název práce** Kostel na Lesné

**Název práce  
v anglickém  
jazyce** The church in Lesna

**Typ práce** Diplomová práce

**Přidělovaný titul** Ing.

**Jazyk práce** Čeština

**Datový formát  
elektronické verze** PDF

**Abstrakt práce** Tato teoretická diplomová práce se zabývá prostorovou akustikou a s tím úzce spojenou problematikou doby dozvuku. Součástí práce je zpracování návrhu akustických úprav kostela na základě ručního výpočtu, který byl dále upravován ve specializovaném softwaru Odeon Room Acoustics Program.

Pro okolní zástavbu kostela byla vytvořena hluková studie v programu Hluk+, aby bylo posouzeno, jaký bude mít tato novostavba hlukový dopad z kostelních zvonů dopad na své okolí.

Na základě specializace, bylo vytvořeno několik návrhů pro konstrukční řešení kostela. A to přibližný návrh dvouplášťové kupole, systém odvodnění spojovacího krčku a způsoby ukotvení pevného velkoformátového okenního zasklení.

Výsledkem práce je vhodný návrh stavebně akustických úprav a zlepšení poslechových kvalit pro budoucí stavbu tohoto kostela.

**Abstrakt práce  
v anglickém  
jazyce** This theoretical diploma thesis deals with room acoustics and the closely related issue of reverberation. Part of the work is a drafting of acoustic modifications of

the church based on manual calculation, which was further modified in a specialized software Odeon Room Acoustics Program.

For the surrounding buildings of the church was created a study of the noise in a program Hluk+ in order to assess what will be the noise impact of this new building on its surroundings.

On the basis of specialization was created several proposals for the design of the church. The approximate proposal of the double-plated dome, a system of drainage of the coupling neck, and the ways the anchor of the hard large-format window glazing.

The result of the work is suitable design of acoustic adjustments and improvement of the listening qualities for the future construction of this church.

**Klíčová slova**

Prostorová akustika, doba dozvuku, Hluk+, kostel, novostavba, Odeon Room Acoustics Program, Brno, Lesná

**Klíčová slova  
v anglickém  
jazyce**

Room acoustics, reverberation time, Hluk+, church, new building, Odeon Room Acoustics Program, Brno, Lesná

## Obsah:

1.	Úvod .....	13
2.	Současný stav řešené problematiky .....	15
2.1.	Základní pojmy obecně .....	15
2.2.	Prostorová akustika .....	18
2.3.	Fyzikální akustika .....	24
2.4.	Geometrická akustika .....	26
2.5.	Akustika sakrálních prostor .....	28
2.6.	Kritéria pro akustiku uzavřených prostor .....	29
2.7.	Konstrukce a materiály využívané pro prostorovou akustiku .....	32
2.8.	Odeon Room Acoustics Program .....	38
2.8.1.	K jakému účelu je využíván .....	38
2.8.2.	Hlavní funkce programu .....	38
2.8.3.	Přístroje pro měření „v terénu“ .....	39
2.8.4.	Metody měření .....	39
2.9.	Manuál pro výpočet modelu v programu ODEON .....	40
2.9.1.	Spuštění programu .....	40
2.9.2.	Základní lišta pro nastavení parametrů .....	42
2.9.3.	Zadání zdroje a mikrofону .....	42
2.9.4.	Test těsnosti modelu .....	44
2.9.5.	Přiřazení materiálů .....	46
2.9.6.	Rychlý odhad doby dozvuku .....	47
2.9.7.	Nastavení rastru výpočtového modelu .....	50
2.9.8.	Nastavení výpočtu .....	51
3.	Cíle diplomové práce .....	54
4.	Zvolené metody zpracování, postup zpracování řešené problematiky .....	56
4.1.	Vypracování modelu objektu a výběr softwaru .....	56
4.1.1.	Vytvoření 3D modelu v programu Google Sketchup .....	56
4.1.2.	Instalace a samotná práce ve Sketchupu .....	59
4.2.	Základní informace o měřeném objektu .....	60
4.3.	Ruční výpočet pomocí aplikace Excel .....	61
4.4.	Simulace v Odeon Room Acoustics Program .....	67
4.4.1.	Rozmístění zdrojů v kostele dle ČNS EN ISO 3382-2 .....	67
4.4.2.	Zhodnocení stávajícího stavu .....	70
4.4.3.	Zhodnocení navrženého stavu .....	73
4.5.	Hluk+ .....	77

4.5.1.	Situační model .....	77
4.5.2.	Výpočet náhradních bodových zdrojů .....	79
4.5.3.	Porovnání s legislativou .....	81
4.6.	Požárně bezpečnostní řešení.....	84
4.6.1.	Požadavky na stavební konstrukce a materiály: .....	85
4.6.2.	Únikové cesty: .....	87
5.	Výsledky diplomové práce s uvedením zjištěných poznatků.....	88
5.1.	Souhrn naměřených a vypočítaných hodnot doby dozvuku a jejich porovnání	88
5.2.	Ostatní sledované parametry počítačové simulace Odeon Room Acoustics Program .....	92
6.	Závěr .....	101
7.	Seznam použité literatury .....	103
8.	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	105
9.	Seznam příloh .....	106



# 1. Úvod

V této diplomové práci se zaměřuji na zpracování akustického návrhu sakrální stavby. Hlavním cílem je dosáhnout kvalitních akustických výsledků pro poslech mluveného slova, zpěvu a také hudby.

V rámci diplomové práce zpracovávám 3D model kostela pro použití výpočtu ve specializovaném programu *Odeon Room Acoustics Program* a s jeho pomocí vypracuji studii pro návrh akustických opatření pro vhodné šíření zvuku z hlediska akustické pohody uvnitř objektu.

Dále provedu výpočet urbanistické zástavby v okolí kostela, v programu Hluk+, ve kterém zjišťuji, jaký na ni mají vliv kostelní zvony a varhanní hudba reprodukováná při bohoslužbě. Dále také auta přijíždějící a odjíždějící z podzemní garáže pod kostelem v tuto dobu a vzduchotechnika sloužící pro odvětrání podzemí, která je umístěna na střeše.

V následujících kapitolách se pokusím vysvětlit samotnou problematiku prostorové akustiky a do jakých odvětví se dělí. Vysvětlím metody výpočtu a měření doby dozvuku. Po této teoretické části se dostaneme k modelaci samotného kostela, kde za pomoci již zmíněného softwaru bude analyzováno šíření zvuku v prostoru a s jeho pomocí se pokusím co nejlépe vyřešit dobu dozvuku tak, aby odpovídala dané normě ČSN 73 0525.

Akustika je vědecká disciplína zabývající se studiem mechanického kmitání a jeho šířením v pružném prostředí. Tento obor je velmi složitý a rozsáhlý a je třeba mu věnovat dostatečnou pozornost. Základní principy jsou odvozeny z teoretické fyziky.

Akustika oborem velmi širokým a člení se do těchto odvětví:

- Fyzikální akustika
- Psychoakustika
- Fyziologická akustika
- Technická akustika
- Prostorová akustika
- Stavební akustika
- Hudební akustika
- Akustika hluku a vibrací
- Akustika ultrazvuku

Mezi těmito jednotlivými úseky akustiky však existují vzájemné vazby a mnohé části se objevují v jiných odvětvích, a proto se dá akustika rozdělit na tyto části:

- Akustika fyzikální

- Akustika fyziologická
- Akustika hudební
- Akustika prostorová
- Akustika urbanistická

*Akustika fyzikální* studuje podmínky a zákonitosti vzniku a šíření zvuku. Vysvětluje zvuk jako mechanické vlnění v pružném prostředí, definuje akustické veličiny, zabývá se objasněním jevů, jako je rezonance atd., zkoumá skládání zvuků a ukazuje, jak můžeme pomocí spekter obecný zvuk popsat.

*Akustika fyziologická* se zabývá vnímáním i produkcí zvuků člověkem, tj. sluchem a řečí. Objasňuje, na čem závisí vnímané akustické kvality: hlasitost, výška a barva zvuku.

*Akustika hudební* pojednává o zvuku se zřetelem k potřebám hudby. Zabývá se kvalitou hudebních tónů, definuje jejich absolutní a relativní výšku a udává kritéria pro konsonanci a disonanci souzvuků. Na základě zákonitostí pohybu hudebních intervalů dává možnost odvozovat hudební stupnice.

*Akustika prostorová* řeší otázky výstavby užitkových akustických prostorů, tj. koncertních sálů, divadel, sakrálních prostor a nahrávacích studií. V užším zaměření se dělí na akustiku geometrickou, dozvukovou a stavební. [2]

Dále se prostorová akustika zabývá:

Studiem akustických jevů uvnitř uzavřených, případně i ne zcela uzavřených prostorů, z hlediska dobré slyšitelnosti a srozumitelnosti přenášeného zvuku. [1]

*Akustika urbanistická* se zabývá studiem akustických jevů ve venkovním prostoru z hlediska ochrany před hlukem. [1]

## 2. Současný stav řešené problematiky

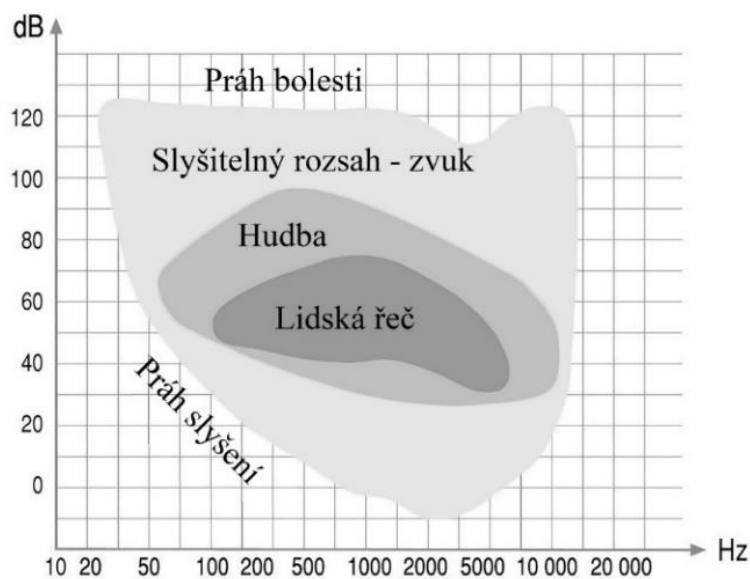
Má diplomová práce je založena na teoretické části, kde se snažím dle architektonického projektu firmy Atelier Štěpán zpracovat problematiku akustiky vnitřních prostor kostela bez možnosti měření přímo v objektu. Je to velmi rozdílné řešení dané problematiky oproti akustickým studiím rekonstrukcí nebo zlepšení poslechového vjemu člověka v již realizovaných objektech. V prvotní studii pro výpočet doby dozvuku jsem počítal s prostory a dílčími materiály, které navrhli architekti pro realizaci tohoto kostela. Jak se ale ukázalo, pro kostel který je zcela navržen jako betonová konstrukce s omítnutými stěnami a podlahy z leštěného mramoru, už předpoklad napovídal, že doba dozvuku v takovýchto prostorách nebude splňovat legislativní požadavky prostorové akustiky.

Po provedení ručního výpočtu doby dozvuku se potvrdilo, že objekt kostela je velmi nedotlumený, a proto díky všem materiálům užitým v interiéru tohoto kostela dochází k obrovskému tříštění zvuku a odrazivosti a to především v nižších frekvencích do 500 Hz.

### 2.1. Základní pojmy obecně

- **Zvuk**

Je definován jako mechanické vlnění pružného prostředí, jež můžeme vnímat sluchem. Pro člověka je tato oblast vymezena pásem slyšitelnosti v kmitočtech přibližně od 16 do 16 000 Hz a rozsahem intenzity mezi *prahem slyšení* (cca  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>) a *prahem bolesti* (cca 10 W/m<sup>2</sup>). [3]



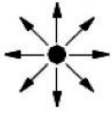
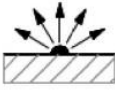


Obr. 1 Grafické znázornění rozsahu zvuku lidského ucha [4]

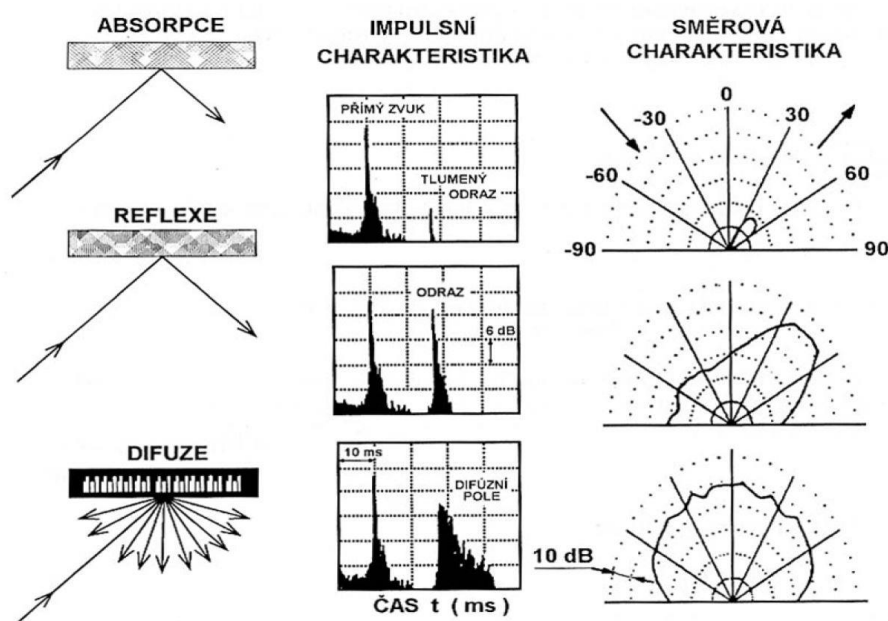
• **Rozdělení oblasti slyšení a jejich frekvencí  $f$ :**

- Infrazvuk s  $f < 16$  Hz,
- Slyšitelné pásmo  $16 \text{ Hz} < f < 16\,000 \text{ Hz}$ . To lze rozdělit na zvuk nízkofrekvenční (16 až 63 Hz), středně frekvenční (63 až 8000 Hz) a vysoko frekvenční (8 000 až 16 000 Hz), zatímco např. nejnižší a nejvyšší tóny klavíru mají kmitočty 27,5 až 4185 Hz.
- Ultrazvuk  $f > 16\,000 \text{ Hz}$

Zvuk se šíří ve všech známých prostředích – v plynném, kapalném i v pevných látkách. Zvukové vlny šířící se prostorem, jsou daným prostředím v nějaké míře pohlcovány, odráženy, rozptylovány, soustřeďovány nebo tlumeny.

Podle polohy zdroje zvuku je nutné charakterizovat způsob vyzařování akustické energie, a toto vyzařování označujeme jako **činitel směrnosti  $Q$**  (-), tj. zvuk je nějakým způsobem směřován. Činitel směrnosti závisí na umístění zdroje vzhledem k odrazivým plochám, ke kterým je zvuk směřován. Číselné hodnoty činitele směrnosti s ohledem na jeho umístění jsou patrné na obr. 2.

<u>VOLNÝ PROSTOR</u>	<u>POLOPROSTOR</u> (např. na tvrdé podlaze)	<u>KVADRANT</u> (např. na hraně mezi dvěma stěnami svírajícími úhel 90°)	<u>OKTANT</u> (v rohu mezi třemi rovinami)
			
$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 4$	$Q = 8$

Obr. 2 Činitel směrovosti zdroje zvuku  $Q$  v závislosti na umístění zdroje [4]

Obr. 3 Typy akustických elementů - rozdělení dle způsobu odrazu zvuku [4]

Zvuk je všude kolem nás, ale pokud je zvuk přijímán v příliš velké míře, působí na člověka negativně a toto přílišné působení zvuku zatěžuje lidské ucho a může se stát příčinou trvalého poškození sluchu. Příliš časté nebo příliš silné zvuky, a taky třeba v nevhodnou dobu se vyskytující, se nazývají *hluk*. [3]

### • Hluk

Hluk má velký vliv na sociální chování člověka. Snižuje vnímavost jedné osoby k situaci druhé osoby, ohleduplnost, ochotu pomoci, schopnost spolupracovat,... Hluk má negativní účinky na člověka a je nutné jeho míru omezovat. [3]

*Hluk pozadí* nepříznivě ovlivňuje poslechové podmínky pro hudbu a srozumitelnost řeči, jedná se o hluk šířící se do daného sálu nebo místnosti od zdrojů uvnitř budovy (např. od vzduchotechnického zařízení), ale i hluk z venkovního prostoru (např. z dopravy). [5]

Nežádoucí zvuky můžeme snížit pomocí prostředků, popř. metody, které mají charakter:

- **Akustické** povahy, např. tlumiče hluku, zvuk pohlcující materiály, tlumící hmoty, vhodná skladba konstrukce apod.
- **Neakustické** povahy, např. dispoziční řešení objektů, změna technologie výroby, změna konstrukce stroje z hlediska dynamiky a kinematicky, apod. [6]

## 2.2. Prostorová akustika

Je to jeden z oborů akustiky, který se zabývá tím, jak se šíří zvuk zcela nebo částečně v uzavřeném prostoru. [6]

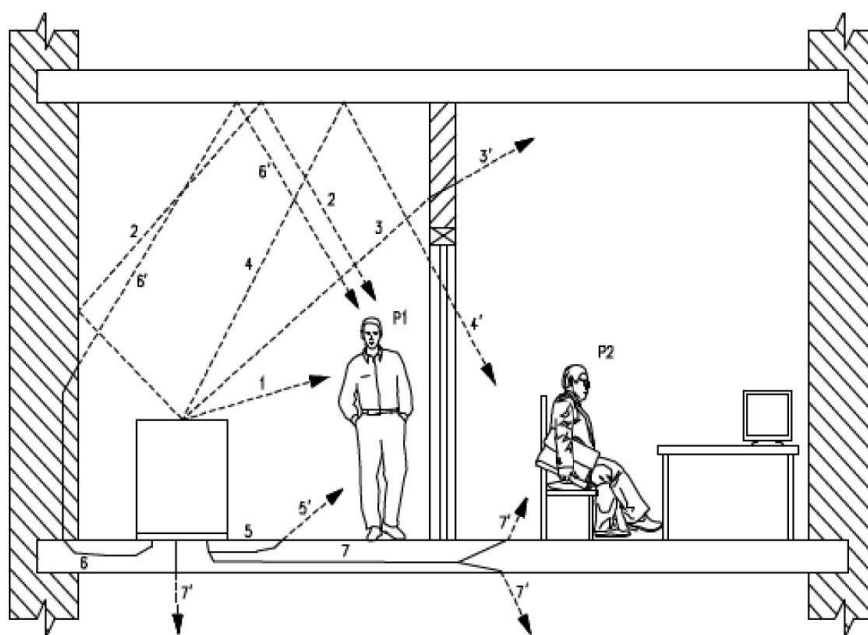
Normy zabývající se prostorovou akustikou jsou ČSN 73 0525, ČSN 73 0526, ČSN 73 0527, ČSN EN ISO 3382-1 a jiné.

Zdroj zvuku je původcem *akustické energie* a vyvolávají ho různá zařízení, např. pro úpravu vzduchu, stroje apod., dále to mohou být předměty, specifické oblasti nebo činnosti člověka, které se šíří do okolí. Ke vzniku akustické energie dochází dvěma způsoby:

- Neustálé proudění plynného nebo kapalného prostředí (např. pomocí ventilátoru)
- Chvění povrchu zdroje zvuku, např. stěny, stropu nebo stroje. Toto chvění se přenáší z kmitajícího povrchu zdroje do okolního prostředí, nejčastěji vzduchu.

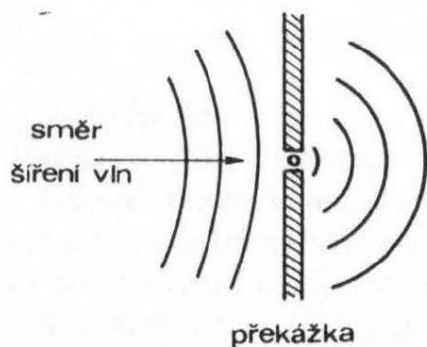
Cesty šíření zvuku jsou buď přímé, nebo nepřímé:

- Přímé – pomocí media, které zdroj obklopují, např. vzduch – tzn. zvuk se šíří vzduchem
- Nepřímé – pomocí spojovacích prvků, např. stavební konstrukcí – tzn. zvuk je vedený konstrukcí (chvění) a následně vyzářen do vzduchu povrchem konstrukce. [6]

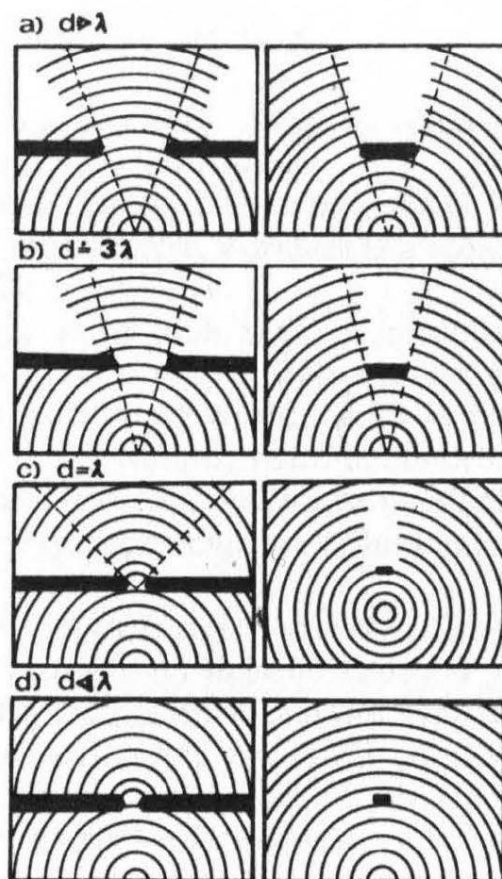


Obr. 4 Cesty šíření zvuku od vlastního zdroje k příjemci [6]

*Huyghensovův princip* vysvětluje časté nežádoucí pronikání zvuku z jednoho uzavřeného prostoru do druhého. Při bližším zkoumání se dá dojít k tomu, že důvodem přenosu zvuku může být i velmi malý otvor. Kvůli takovému malému konstrukčnímu nedostatku se může stát překážka (stěna) neúčinná, protože daný otvor se tak stává bodovým zdrojem zvuku. Huyghensovův princip dále popisuje jevy vznikající u překážek, kdy i sloup v koncertním sále může způsobit problémy, neboť z jeho odlehle strany ke zdroji zvuku vzniká akustický stín. [7]



Obr. 16: Uplatnění Huyghensova principu



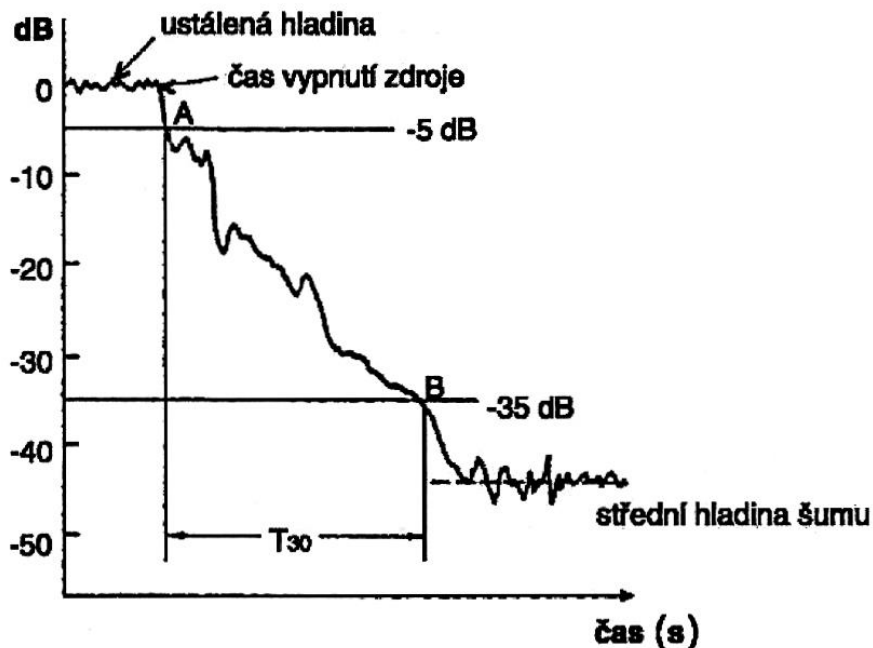
Obr. 17: Působení mezery a překážky

Obr. 5 Huyghensovův princip šíření zvukových vln [7]

*Akustika prostoru* je souhrn akustických vlastností a parametrů místnosti určujících poslechovou kvalitu mluveného slova, nebo hudby. [6]

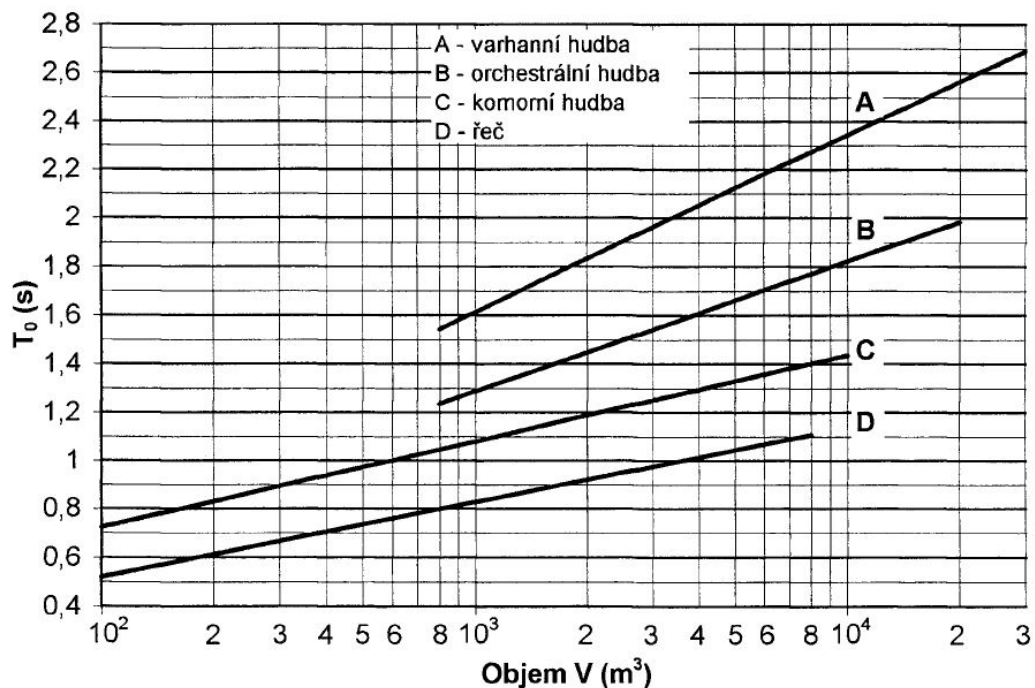
*Doba dozvuku T* patří mezi základní sledované veličiny. Jedná se o objektivní kritérium definované jako čas v sekundách potřebný pro pokles hladiny akustického tlaku o 60 dB po vypnutí zdroje. Získá se lineárním proložením dozvukového poklesu v úseku od -5 dB do -35 dB (T30) nebo od -5 dB do -25 dB (T20). Při návrhu se hodnota počítá z příslušných výpočetních vztahů. [7]

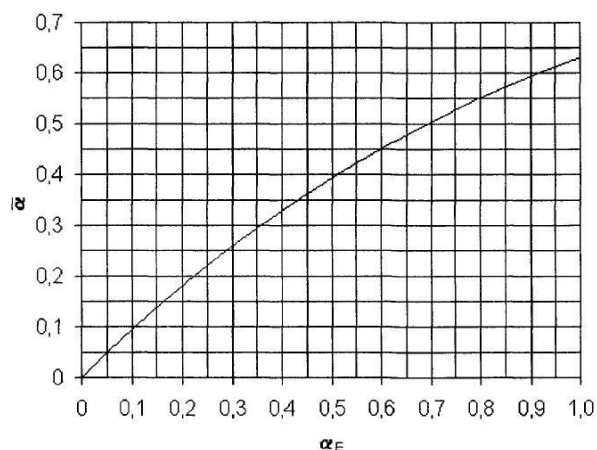




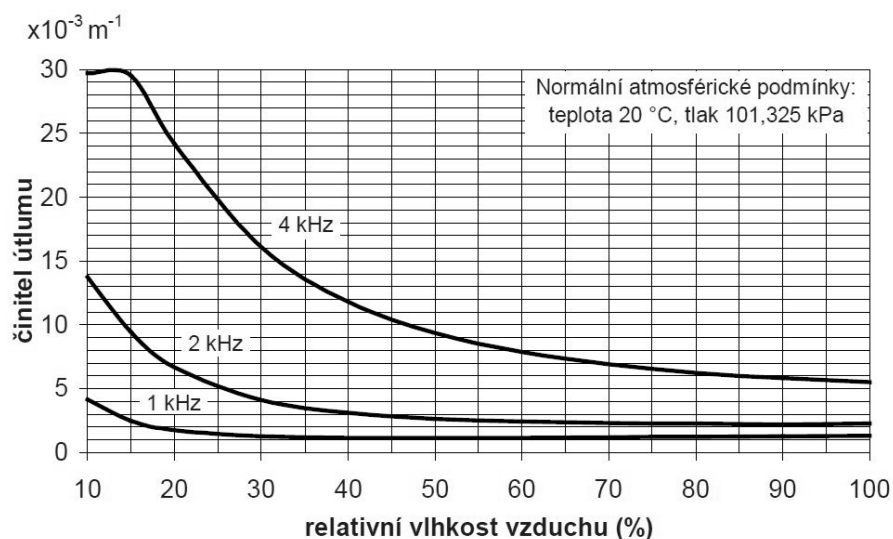
Obr. 6 Určení doby dozvuku z dozvukových křivek [4]

Graf pro výpočet a kontrolu doby dozvuku:

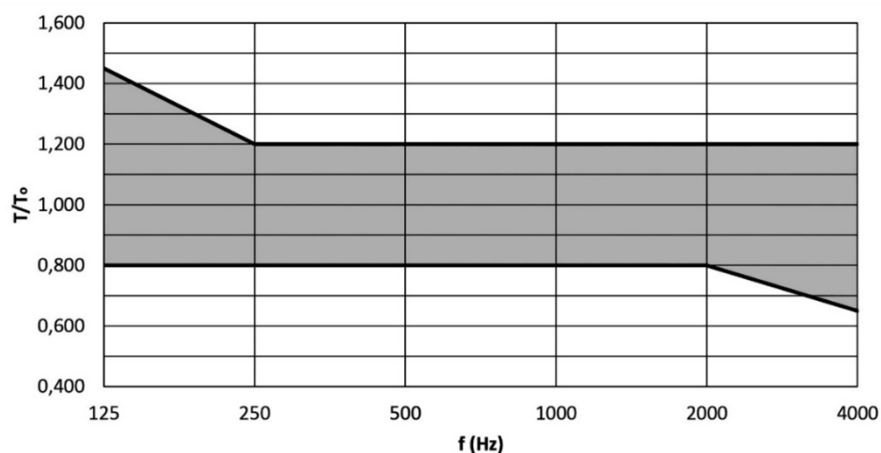
Obr. 7 Závislost optimální doby dozvuku  $T_0$  (s) pro kmitočet 1000 Hz na objemu  $V$  ( $m^3$ ) uzavřeného prostoru v obsazeném stavu [7]



Obr. 8 Převodní graf mezi hodnotami středního činitele zvukové pohltivosti  $\bar{\alpha}$  Eyringova činitele zvukové pohltivosti  $\alpha_E$  [7]



Obr. 9 Závislost činitele útlumu zvuku  $m$  v oktávových pásmech na relativní vlhkosti vzduchu [7]



Obr. 10 Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku  $T/T_0$  obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma. [5]

Doba dozvuku se dá vypočítat dle empirických výpočtů (viz *kap. 2.6*):

- Podle Sabine
- Podle Eyringa
- Podle Millingtona [6]

*Optimální doba dozvuku  $T_o$*  je hodnota v sekundách doporučovaná pro dobu dozvuku  $T$  podle účelu místnosti a její velikosti. Dosažení podobných hodnot je základním předpokladem pro získání požadovaných poslechových kvalit uzavřeného prostoru. [7]

*Zvuková pohltivost* je definována jako schopnost určité látky, nebo materiálu absorbovat část akustické energie dopadající na jeho povrch přeměnou na tepelnou energii. [7]

*Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$*  je bezrozměrný součinitel vyjadřující podíl pohlcené akustické energie k celkové akustické energii dopadající na rozhraní prostředí (povrch materiálu). Pokud nabývá hodnot 1,00, pak se jedná o látku 100% pohltivou a naopak při hodnotách 0,00 se jedná o látku plně odrazivou. [7]

*Ekvivalentní pohltivá plocha  $A$*  je odpovídající plocha v  $\text{m}^2$  plně pohltivého materiálu pro posuzovaný materiál o ploše  $S$  v  $\text{m}^2$ . Jedná se o součin plochy materiálu  $S$  a činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ . [9]

$$A = \alpha \cdot S \quad (\text{m}^2) \quad (2.1)$$

*Zvukový paprsek* reprezentuje velmi malou výseč z kulové akustické vlny šířící se od jejího zdroje všemi směry a slouží jako názorná ukázka šíření zvuku od jejího zdroje všemi směry podle pravidel geometrické akustiky. [7]

*Jasnost* je veličina vyjadřující úroveň poslechové kvality hudby v uzavřeném prostoru a reprezentuje rozlišitelnost jednotlivých tónů při rychlých hudebních pasážích. [1]

*Zřetelnost* je veličina vyjadřující úroveň poslechové kvality mluveného slova v uzavřeném prostoru a charakterizuje rozlišitelnost jazykových prvků plynulé řeči v čase. Jedná se tedy o srozumitelnost lidské řeči. [7]

*Srozumitelnost* je poměr prvků řeči (slabiky, celá slova nebo části vět) zaslechnutých správně k celkovému počtu vysílaných prvků řeči. [7]

*Křivka poklesu* je grafické zobrazení poklesu hladiny akustického tlaku po vypnutí zdroje. [8]

*Neobsazený stav* je takový stav, kdy se v sálu nevyskytují žádné osoby (účinkující, obecenstvo). U koncertních a operních sálů je tento stav uvažován i včetně židlí pro účinkující, notových pultů, bicích nástrojů apod. [8]

*Studiový stav* je takový stav, kdy je sál obsazen pouze řečníky, účinkujícími a nezbytnými osobami jako technici apod. avšak bez diváků. Jedná se o stav, který je běžný například při zkouškách nebo záznamech zvuku. [8]

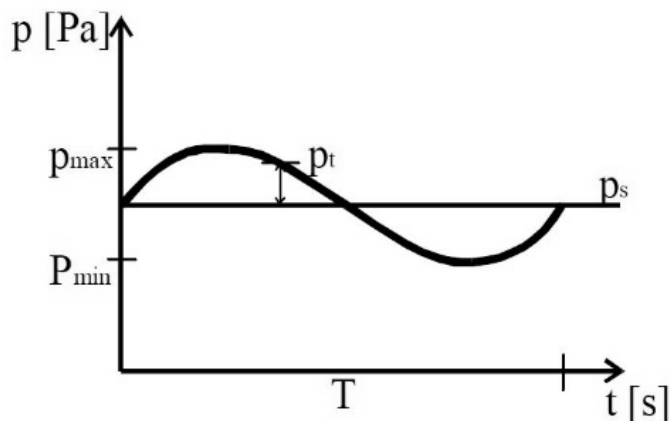
*Obsazený stav* je takový stav, kdy je sál obsazen z 80% až 100%. Běžně se při výpočtu uvažuje obsazení ze 2/3. [8]

*Uzavřený prostor* je prostor ohraničený plochami, které tvoří „obálku“ místnosti/prostoru a vykazují určité akustické vlastnosti. [7]

## 2.3. Fyzikální akustika

*Akustický tlak* je jednou z nejdůležitějších veličin užívanou pro vyjádření síly zvuku. Sluchový orgán člověka může přijímat zvuk z jakéhokoli směru, vnímá tedy akustický tlak (nikoli intenzitu zvuku), který lze nejsnadněji měřit. V praxi proto akustickým tlakem nahrazujeme důležitou dimenzi zvuku - intenzitu. [6]

*Akustický tlak*  $p$  ( $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ) je skalár a vyjadřuje rozdíl mezi barometrickou hodnotou tlaku vzduchu, měnící se zvolna v závislosti na atmosférických podmínkách, a okamžitou hodnotou tlaku při akustickém ději. [6]



Obr. 11 Celkový atmosférický tlak  $p$ , akustický tlak  $p_t$  a statický tlak  $p_s$  [6]

*Akustická rychlost*  $v$  vyjadřuje rychlost kmitání částic prostředí (vzduchu) kolem klidové polohy při akustickém vlnění. Při volném postupném vlnění je poměr mezi akustickým tlakem  $p$  a akustickou rychlostí  $v$  stálý a závisí na konstantách prostředí podle vztahu

$$\frac{p}{v} = \text{konst.} = \rho_0 \cdot c \quad (\text{s}) \quad (2.2)$$

kde  $\rho_0$  je hustota prostředí v  $\text{kg.m}^{-3}$ ,  
 $c$  rychlost šíření zvuku v prostředí v  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $v$  akustická rychlost v  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $p$  akustický tlak v  $\text{N.m}^{-2}$  [10]

*Akustický výkon*  $W$  udává míru přenosu akustické energie, která se přenáší při akustickém vlnění. Je to veličina periodicky závislá na čase, stejně jako akustický tlak nebo akustická rychlost. Výkon kmitavého děje v ustáleném stavu je definován jako práce vykonaná za jednotku času, kde práce je součinem síly a dráhy. Okamžitý výkon je pro diferenciálně malé časové úseky dán součinem působící síly  $F$  a akustické rychlosti kmitavého děje

$$W = F \cdot v \quad (\text{W}) \quad (2.3)$$

kde  $F$  je síla působící v N,  
 $v$  akustická rychlost v  $\text{m.s}^{-1}$  [6]

*Rychlost šíření zvuku*  $c$  vyznačuje, jak daleko dospěje zvukový rozruch od místa pozorování za 1 s ve směru šíření zvuku. Závisí na materiálových vlastnostech a teplotě. Pro plyny i jiné materiály je tedy charakteristickou konstantou, která se mírně mění v závislosti na teplotě daného prostředí. Pro vzduch se při teplotě 20 °C uvažuje rychlost zvuku  $c = 343 \text{ m.s}^{-1}$ . Při jiných teplotách je rychlost dána podle vztahu

$$c = 331,8 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} = 331,8 + 0,6 \cdot t \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad (2.4)$$

kde  $t$  je teplota vzduchu ve °C,  
 $T_0$  273,15 K [6]

*Vlnová délka*  $\lambda$  je dráha, kterou proběhne vlna rychlostí  $c$  za dobu jedné periody  $T$ . Je charakteristickou veličinou pro vlnění. Platí pro ni vztah

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (\text{m}) \quad (2.5)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku v  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $T$  doba jedné periody v s,  
 $f$  frekvence vlnění (zvuku) v Hz [6]

*Intenzita zvuku*  $I$  určuje povahu zvukové energie a akustický výkon zdroje zvuku. Je částí akustické energie, šířící se za 1 s postupnými akustickými vlnami plochou  $1 \text{ m}^2$ , postavenou kolmo ke směru šíření zvuku. Platí pro ni vztah

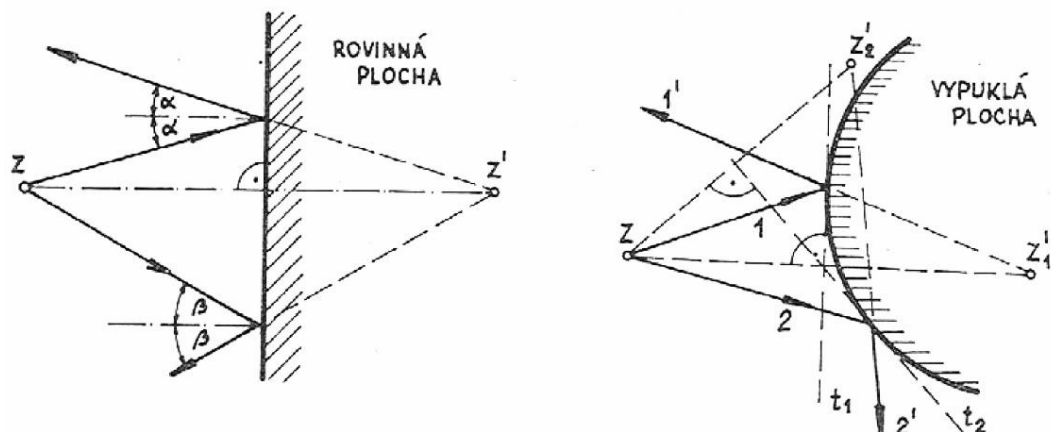
$$I = p \cdot v = v^2 \cdot \rho_0 \cdot c \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (2.6)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku v  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $v$  akustická rychlost v  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $p$  akustický tlak v  $\text{N.m}^{-2}$ ,  
 $\rho_0$  hustota prostředí v  $\text{kg.m}^{-3}$  [10]

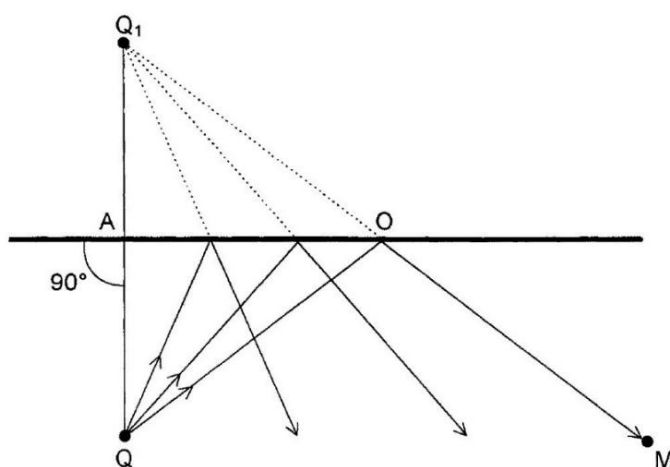
## 2.4. Geometrická akustika

Zabývá se chodem zvukových paprsků vysílaných zdrojem, vyšetřováním dráhových a časových rozdílů mezi zvukem do uvažovaného místa přímo od zdroje a zvukem odraženým. [6]

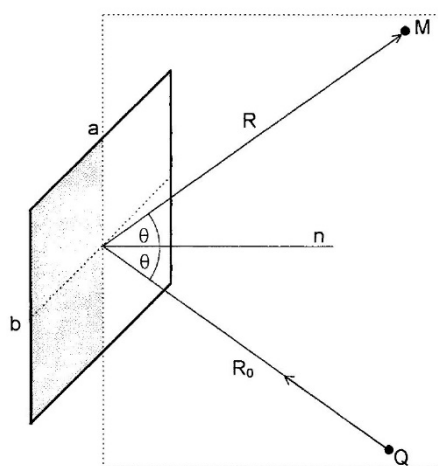
Pro zvuk platí pravidlo jako je ve fyzikálním zákonu, že úhel dopadu tělesa se rovná úhlu odrazu. Konstrukci zvukových paprsků po odrazu od rovinných konstrukcí provádíme pomocí zdánlivého zdroje  $Z'$  jako je tomu na *obr. 12*.



Obr. 12 Konstrukce odrazu zvukových paprsků pomocí zdánlivého zdroje [6]

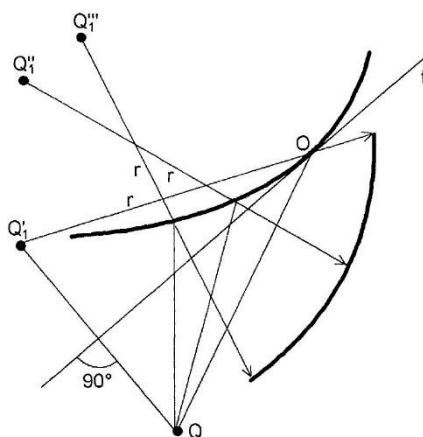


Obr. 13 Konstrukce geometrických odrazů od rovinné plochy pomocí zrcadlového zdroje:  $Q$  - zdroj zvuku,  $Q_1$  - zrcadlový odraz zdroje,  $A$  - pata kolmice vedené z bodu  $Q$  na rovinnou plochu,  $O$  - bod odrazu,  $M$  - místo příjmu [7]



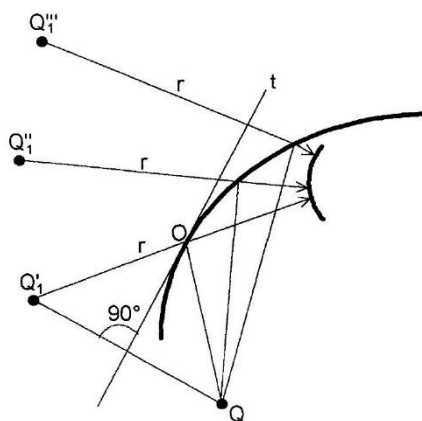
Obr. 14 Odraz zvuku od rovinné tuhé desky o rozměrech  $a$ ,  $b$ :

$R_0$  - vzdálenost zdroje  $Q$  od středu desky,  $R$  - vzdálenost místa příjmu  $M$  od středu desky,  $\theta$  - úhel dopadu (odrazu) zvukového paprsku,  $n$  - normála k desce [7]



Obr. 15 Konstrukce geometrických odrazů od vyduté plochy:

$Q$  – zdroj zvuku,  $Q_1$  – zrcadlový odraz zdroje,  $t$  – tečna v bodě odrazu  $O$ ,  $r$  – zvolená délka zvukových paprsků [7]



Obr. 16 Konstrukce geometrických odrazů od vypuklé plochy:

$Q$  – zdroj zvuku,  $Q_1$  – zrcadlový odraz zdroje,  $t$  – tečna v bodě odrazu  $O$ ,  $r$  – zvolená délka zvukových paprsků [7]

## 2.5. Akustika sakrálních prostor

Návrh tvaru a geometrie chrámového prostoru je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících zvukovou kvalitu liturgického obřadu jak v úrovni slovního, tak i hudebního projevu. O tom, že se i v době minulé těmito problémy architekti a stavitelé intenzivně zabývali, svědčí analýza citace slavného římského stavitele Marka Polia Vitruvia:

" ... jest přihlédnouti s velkou bedlivostí k tomu, aby byl objekt, ve kterém se hlas bude klidně šířit, řešen tak, aby se nevracel odrazem a nepřinášel uším pouze neurčité



*náznaky. Je totiž mnoho míst, které svým přirozeným položením pohyb zvuku ruší, jako místa desonanční (bezzvuká), místa cirkumsonanční (se zvukem rozptylujícím se vůkol), dále resonanční (ozvučná) a konsonanční (souzvučná).“*

**Desonanční místa** jsou ta, v nichž první zvuk po svém vystoupení do výše je pevnými, výš položenými tělesy rušen a srážen nazpět: zůstává proto ležeti dole a ztěžuje vzlet zvuku následujícího za ním.

**Cirkumsonanční místa** jsou ta, kde zvuk, nucený bloudit kolem dokola, zaniká uprostřed, zní bez koncovek a ztrácí se tam v neurčitých náznacích slov.

**Resonanční** jsou ta, na nichž se zvuk vrací zpět, naraziv při dopadu na nějaký pevný předmět, budí ozvěnu a poslední slabiky na poslech zdvojuje.

**Konsonanční** jsou místa, na nichž se hlasu odspodu napomáhá, ten při stoupání do výše sílí a dospívá k uším s jasnou zřetelností. [14]

## 2.6. Kritéria pro akustiku uzavřených prostor

Uzavřené prostory se dělí na prostory pro:

- Veřejné účely
- Školní účely
- Kulturní účely
- Nevýrobní pracovní prostory
- Místnosti pro snímání, poslech a zpracování zvuku [7]

Objem uzavřeného prostoru se stanoví dle provozních, hygienických a akustických požadavků. Z provozních a hygienických požadavků jsou dány 4 m<sup>3</sup> na jedno plánované místo.

Z akustického hlediska je hranice určena na základě několika skutečností:

- Při obsazení malého prostoru dojde zpravidla ke krátké době dozvuku a nelze u něj dosáhnout ideální doby dozvuku.
- Pokud je akustický výkon zdroje pro daný prostor příliš velký, např. orchestr v malém prostoru, pak ani snaha o snížení akustického tlaku pomoci

pohltivých obkladů není ideální, protože zároveň s tím klesá i doba dozvuku a ta neodpovídá požadavkům na koncertní sály.

- V uzavřeném prostoru o objemu menším než  $100 \text{ m}^3$  je hustota vlastních kmitů na nízkých kmitočtech malá a přenosová charakteristika prostoru vykazuje proto v této kmitočtové oblasti značnou nevyrovnanost, projevující se zkreslením barvy zvuku.
- Horní hranice uzavřeného prostoru je dána akustickým výkonem předpokládaného zdroje zvuku a možností dosáhnout optimální doby dozvuku pro daný typ přirozeného zvukového signálu. Doporučené maximální hodnoty jsou v následující tabulce: [7]

Tab. 1: Maximální objemy prostorů doporučené z hlediska akustického výkonu zdrojů živé hudby a řeči [7]

Účel využití	Řeč	Hudební divadlo	Komorní hudba	Symfonická hudba	Varhanní hudba
Max. objem ( $\text{m}^3$ )	5 000	15 000	5 000	25 000	30 000

Tab. 2: Technické požadavky kladené na prostory sloužící ke kulturním účelům [6]

Prostor	Počet osob	Objem $V (\text{m}^3)$ na 1 osobu	Číslo závislosti $T_{\text{opt}}$ na $V$ (vztah)	Číslo rozhraní $T/T_{\text{opt}}$ (tab. 6.12)	Poznámka
Koncertní sál:					$V \leq 4000 \text{ m}^3$
Varhanní hudba	-	10 až 12	Obr. 6.17	1	
Symfonický orchestr	do 2000	8 až 10		1	
Komorní hudba	do 500	6 až 8		1	
Opera	do 1500	6 až 8	(6.28)	1	$V \leq 12000 \text{ m}^3$
Hudební divadlo	-	6 až 8	(6.28)	1	
Zkušebna orchestru, pěveckého sboru	do 250	8	(6.29)	1	$V \geq 2000 \text{ m}^3$
Víceúčelový sál	-	5 až 7	(6.29)	2	
Činoherní divadlo	do 1200	4 až 6	(6.30)	3	$V \leq 6000 \text{ m}^3$
Zkušebna činohry	do 50	4 až 6	(6.30)	3	
Přednáškový sál	do 400	4 až 5	(6.30)	3	$V \leq 2000 \text{ m}^3$
Kino s jednoráz. zvukovým zařízením	do 400 nad 400	4 až 5 5 až 6	(6.31)	4	
Kino s vícekanál. zvukovým zařízením analogovým	do 400 nad 400	4 až 5 5 až 6	(6.31)	5	Doporučuje se hladina NC-25

**Doba dozvuku** je doba, za kterou poklesne v uzavřeném prostoru hladina akustického tlaku  $L_p$  o 60 dB po vypnutí zdroje. [6]

Dobu dozvuku odvodil na počátku 20. století **Sabine** vztahem:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \quad (2.7)$$

kde  $V$  je objem místnosti ( $m^3$ ),

$A$  celková pohltivost místnosti ( $m^2$ ) [6]

*Zvuková pohltivost  $A$*  je dána vztahem:

$$A = \alpha \cdot S \quad (2.8)$$

kde  $\alpha$  je činitel pohltivosti v kmitočtovém pásmu (-),

$S$  plocha povrchu ( $m^2$ ) [6]

Ve 30.-tých letech **Eyring** upravil vztah pro výpočet doby dozvuku s úvahou, že dochází k postupnému (skokovému) zmenšování intenzity zvuku po každém odraze v závislosti na čase.

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha_E} \quad (2.9)$$

kde  $\alpha_{stř} = A/S$  je střední činitel pohltivosti pro daný kmitočet (-),

$A$  celková pohltivost místnosti ( $m^2$ )

$S$  celková plocha povrchů uzavřeného prostoru ( $m^2$ )

$\alpha_E = -\ln(1 - \alpha_{stř})$  Eyringův činitel zvukové pohltivosti [6]

**Eyringův vztah** pro výpočet doby dozvuku se doporučuje používat pro místnosti, kde činitel zvukové pohltivosti nabývá hodnot  $0,2 < \alpha_{stř} < 0,8$  [6]

Pokud jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti  $\alpha_{stř} > 0,8$  a objem místnosti je  $V > 2\,000\,m^3$  používá se pro kmitočty  $f \geq 2\,000\,Hz$  **Millingtonův** vztah

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha_E + 4mV} \quad (2.10)$$

kde  $m$  je činitel útlumu zvuku při šíření ve vzduchu, je závislý na relativní vlhkosti vzduchu  $\varphi_i$  a na teplotě vzduchu  $\theta_i$  ( $m^3$ ) viz *tab. 3* [6]

Tab. 3: Činitel útlumu ve vzduchu  $m$  ( $m^{-1}$ ) při šíření ve vzduchu pro oktařová pásma v normálních atmosférických podmínkách ( $p = 101,325 \text{ kPa}$ ,  $\theta_i = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [6]

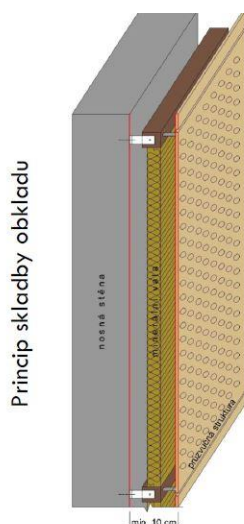
f (Hz)	Relativní vlhkost $\varphi_i$ (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
1000	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012	0,0013
2000	0,0041	0,0031	0,0027	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022
4000	0,0161	0,0118	0,0094	0,0079	0,0069	0,0063	0,0058

## 2.7. Konstrukce a materiály využívané pro prostorovou akustiku

- Porézní a vláknité pohlcovače

Jsou to materiály o vysoké pórovitosti. Kostru materiálů tvoří vlákna nebo ztuhlá pěna, jejichž póry musí být vzájemně propojené a otevřené do volného prostoru. Pro takové účely se používají hlavně rohože a desky z minerálních nebo organických vláken. Je důležité dbát na to, aby se póry neuzavřely nevhodnou povrchovou úpravou, jinak by neplnily svůj hlavní účel. Je přípustné uzavřít je tkaninou, sítí nebo deskovým materiálem s otvory s procentem děrované plochy 25% a více.

Jejich účinnost závisí na jejich umístění a na kmitočtu zvuku. Nejúčinnější jsou ve vzdálenosti rovné lichému násobku čtvrtiny vlnové délky pohlcovaného zvuku od tvrdého povrchu. Díky tomu mají tyto pohlcovače největší účinnost na vysokých kmitočtech, kde je jejich vlnová délka krátká. Pohltivost lze regulovat tloušťkou  $h$  (m), nebo odsazením  $d$  (m) od stěny. [3]

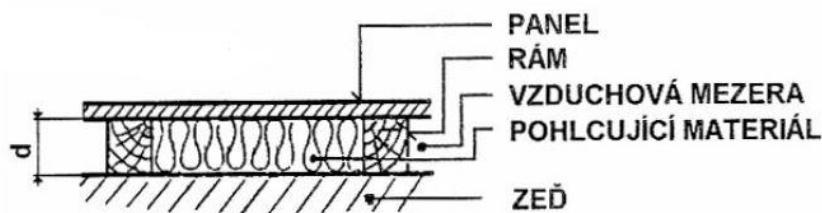


*Obr. 17 Skladba porézního absorbéru:  
Nosná konstrukce (stěna), minerální vata, průzvučná deska (min. vzdálenost od konstrukce je 10 cm) [4]*

#### • Kmitající membrány a desky

Jde o tenkou desku nebo fólii připevněnou na dřevěný nebo kovový rošt, který určuje tloušťku vzduchové dutiny mezi pevním povrchem a membránou. Pro jejich výrobu se využívá např. koženka nebo polyetylenová fólie. Takto vytvořená konstrukce pohlcuje zvuk v poměrně úzkém pásmu a to zpravidla na nízkých kmitočtech v okolí rezonančního kmitočtu.

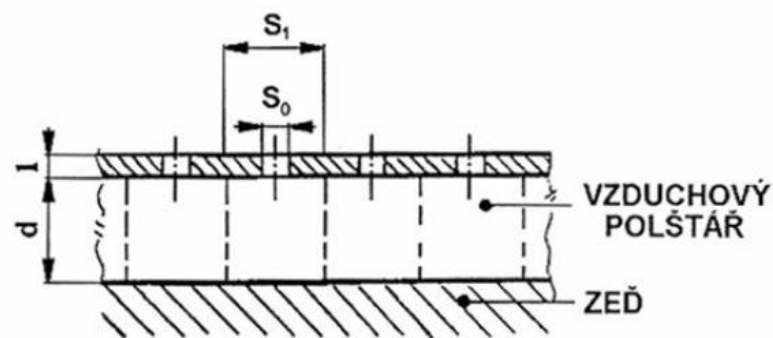
Pro úpravu rezonančního kmitočtu stačí zvýšit plošnou hmotnost membrány a tloušťku vzduchové mezery. Tím se docílí snížení rezonančního kmitočtu. Plošnou hmotnost lze zvýšit pomocí tuhé kmitající desky např. dřevotřískové, dřevovláknité apod. Tato deska musí být k podkladu připevněna měkce, např. přes plstěné pásy, osazením do pěnové pryže nebo přilepením na pásy koženky ta, aby byla schopna po dopadu zvukové vlny kmitat jako celek (píst). Je důležité, aby bylo připojení desek na rošt, stejně jako u membrán, vzduchotěsné. Výhodou tohoto systému je pohlcování zvuku o nízkém kmitočtu. [3]



*Obr. 18 Skladba kmitajícího panelu [4]*

- **Dutinové rezonátory**

Pohlcování zvuku dutinovými rezonátory je též na principu rezonance, při níž jsou kmitající prvkem kmitající částice vzduchu v otvoru spojujícím vzduchovou dutinu s vnějším prostředím. Rezonanční kmitočet je určen rozměry vzduchové dutiny a rozměry a tvarem spojujícího otvoru. Tak jako u předchozích typů lze pásmo pohlcování rozšířit a to vložením pórovitého materiálu do dutiny. Tento způsob se používal už ve starověku, jak to dokazují nálezy amfor (*starověká keramická nádoba*) zabudovaných v antických chrámech a amfiteátrech. Dnes se dutinové rezonátory používají jako *tvárnivé rezonátory*, kde je rezonanční systém tvořen speciální tvárnici nebo keramickým prvkem či jako děrované desky, u nichž lze kmitočet regulovat volbou velikosti a hustoty otvorů i odsazením  $d$  (m) od pevného podkladu. [3]



Obr. 19 Dutinový rezonátor [4]

- **Kombinované pohlcovače – zavěšená akustická tělesa**

Řadíme sem vícenásobné rezonanční soustavy vytvořené několika rezonančními prvky zařazenými za sebou a akustická tělesa, což jsou prostorové útvary vyrobené většinou z pórovitého materiálu krytého pletivem nebo tkaninou mající tvar jednoduchých geometrických těles. Takto vytvořené konstrukce se používají jako zavěšené soustavy pod stropní konstrukci. Kombinované pohlcovače poskytují nejlepší efekt tj. nejvyšší činitele pohltivosti  $\alpha$  (-) v rozsahu co možná nejširšího pásma kmitočtů. [3]

- **Rozptylové prvky**

Akustickou kvalitu uzavřených prostor příznivě ovlivňuje rozptyl zvuku.

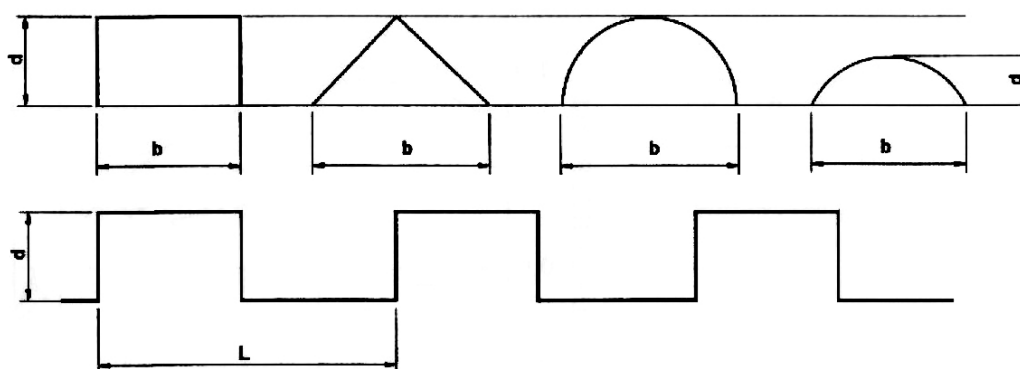
Pro úpravu akustického pole v prostoru se užívají různé difuzní prvky, tzv. difuzory. Jde o prvky zajišťující rozptyl zvukového vlnění. Tvarově jsou uspořádány tak, aby měly vhodně volenou reliéfní úpravu. Např. jehlany nebo různě lomené či vypouklé

plochy. Již nějakou dobu je rozšířeno užívání nových velmi účinných difuzních prvků na principu tzv. akustické difrakční mřížky. Označují se jako RPG (z anglického názvu *Reflection Phase Grating*, to znamená odrazová fázová mřížka).

Důležitým faktorem pro dobrou účinnost rozptylového prvku jsou jeho dílčí rozměry ve vztahu k délce dopadajících zvukových vln. Obecně k rozptylu dochází tehdy, pokud prostorová nerovnost (výška reliéfu) prvku rozměrově odpovídá nebo přesahuje délku vlny. Rozptylové prvky by v ideálním případě měly odrážet zvuk do celé poloviny v co nejširším kmitočtovém rozsahu.

Potřebného rozptylného účinku se dosahuje vhodnou volbou a prostřídáním prvků nebo jejich periodickým uspořádáním. [1]

#### Klasické rozptylové prvky:



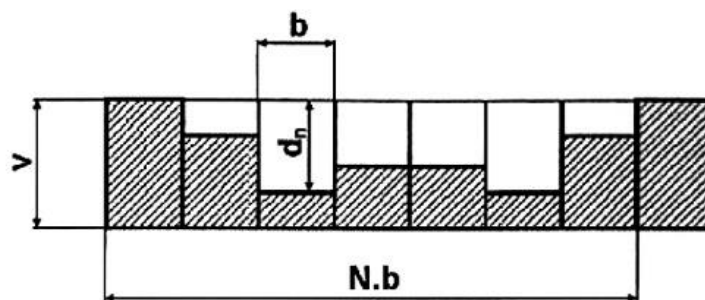
Obr. 20 Periodické struktury rozptylující zvuk [1]

- **Difuzéry (difuzní prvek RPG)**

Difuzní panel RPG je tvořen soustavou stejně širokých, ale různě hlubokých šachet vzájemně oddělených tenkými přepážkami, jak je naznačeno na *obr. 21*.

Dopadající zvuková vlna se odráží v jednotlivých šachtách ode dna a vrací se zpět. V důsledku různých hloubek šachet mají odražené zvukové vlny u povrchu panelu různé fáze. Dochází k difrakčním jevům a rovnoměrnému šíření odrazů do poloprostoru nad panelem v celém pracovním pásmu kmitočtů. Porovnání časového a prostorového rozložení odražené energie u panelu RPG a u prvku akusticky pohltivého a odrazivého je znázorněno na *obr. 3*.

Uvažovaný typ panelu s podélnými šterbinami se označuje jako jednorozměrný na rozdíl od dvourozměrného, u něhož mají šachty čtvercový půdorys. Základní vztahy pro výpočet jednorozměrného panelu jsou uvedeny v následující části. [1]



Obr. 21 Řez difuzním panelem RPG

$B$  – šířka šachty,  $d_n$  – hloubka šachet,  $v$  – výška panelu,  $N$  – počet šachet (1 perioda) [1]

### Výpočtové vztahy pro návrh RPG panelů:

Prvky RPG se navrhují pro zvolený rozsah kmitočtů od spodního kmitočtu pracovního pásma  $f_0$  [Hz] do horního kmitočtu pracovního pásma  $f_{\max}$  [Hz]. Šířka šachet  $b$  je určena vztahem

$$b = \frac{c}{2 \cdot f_{\max}} \quad (\text{m}) \quad (2.11)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku.

Potřebný počet šachet  $N$  panelu pro jednu periodu opakování se určí ze vztahu

$$N = (p - 1) \frac{f_{\max}}{f_0} = (p - 1) \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot b} \quad (2.12)$$

kde  $p$  je počet hlavních směrů odrazů (laloků směrové charakteristiky) v úhlu  $\pm 90^\circ$  při kmitočtu  $f_0$ .

Pro správnou funkci difuzoru musí být  $N$  prvočíslo, proto se počet šachet (1 perioda) stanoví jako prvočíslo nejbližší vyšší k hodnotě vypočítané dle (2.12).

Hloubky šachet  $d_n$  jsou určeny kvadratickou řadou podle vztahu

$$d_n = S_n \frac{c}{2 \cdot N \cdot f_0} \quad (\text{m}) \quad (2.13)$$

Pro koeficienty  $S_n$  platí

$$S_n = n^2 \pmod{N} \quad (2.14)$$

kde  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ,  $\text{mod } N$  je modul čísla  $N$ , tj.  $S_n = n^2 - kN$ , kde  $k$  je celá část čísla  $n^2/N$ .

Hloubka šachet se pohybuje v rozmezí od 0 do přibližně poloviny vlnové délky kmitočtu  $f_0$ . Šachty vykazují zrcadlovou symetrii vůči středové ose panelu a pro  $n \geq N$  se periodicky opakují.



Počet hlavních směrů odrazů  $p$  je dán upraveným vztahem

$$p = \frac{2 \cdot f_0 \cdot N \cdot b}{c} + 1 \quad (2.15)$$

Pro dosažení dobré účinnosti by pro kmitočet  $f_0$  mělo existovat alespoň 5 směrových laloků. S rostoucím kmitočtem počet laloků vzrůstá.

Rovnoměrnost rozptýlu závisí na součinu  $N \cdot b$  (obr. 21), tj. na periodě opakování jednotlivých šachet. Širokopásmového účinku se dosáhne u difuzoru s dlouhou periodou opakování velkého počtu hlubokých a úzkých šachet. [1]

- Vybrané konstrukční stavební a porézní materiály**

Tab. 4: Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti konstrukčních stavebních a porézních materiálů [1]

Konstrukce (tloušťka (mm) / odsazení)	Kmitočet $f$ (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Beton hutný	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Beton vylehčený	0,2	0,22	0,23	0,25	0,21	0,26
Beton s olejovým nátěrem	0,01	0,014	0,016	0,017	0,018	0,02
Čalouněné křeslo zvuková pohltivost v $m^2$ na jeden kus	0,15	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
Čalouněné křeslo obsazené zvuková pohltivost v $m^2$ na jeden kus	0,25	0,3	0,4	0,45	0,45	0,4
Dřevěné křeslo zvuková pohltivost v $m^2$ na jeden kus	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Dřevěné křeslo obsazené zvuková pohltivost v $m^2$ na jeden kus	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35	0,35
Dřevotřísková deska (20/50 až 150)	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
Dřevotřísková deska (odsazení = 0 mm)	0,08	0,08	0,09	0,1	0,1	0,1
Dřevovláknitá měkká deska (15/0)	0,1	0,15	0,55	0,52	0,5	0,45
Deska z pěnového polystyrénu (18 až 32/0)	0,02	0,02	0,03	0,08	0,14	0,29
Koberec bouclé (5/0)	0,08	0,1	0,1	0,21	0,43	0,78
Koberec kokosový (6/0)	0,17	0,06	0,11	0,19	0,37	0,8
Koberec plyšový (10/0)	0,13	0,11	0,15	0,3	0,63	0,9
Linoleum (-/0)	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Okenní otvor zasklený	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Omítka malovaná hlinkou (-/0)	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Omítka s olejovým nátěrem (-/0)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Otvor jeviště s dekoracemi	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Publikum v hledišti (plocha obsazená publikem)	0,41	0,48	0,54	0,57	0,56	0,53
Překližka laťová (18/70)	0,27	0,08	0,11	0,09	0,09	0,2
Sádrokartonová deska (9,5/100)	0,11	0,13	0,05	0,02	0,02	0,03
Vlasy dřevěné (-/0)	0,03	0,04	0,06	0,12	0,1	0,17
Vodní hladina	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Zdivo cihelné režné (-/0)	0,024	0,025	0,032	0,042	0,049	0,07

## 2.8. Odeon Room Acoustics Program

### 2.8.1. K jakému účelu je využíván

ODEON software je vyvinut pro simulaci a měření vnitřní akustiky budov. Vzhledem ke geometrii a povrchovým vlastnostem, můžeme akustiku předvídat, ilustrovat a poslouchat. Ozvučování lze snadno integrovat do akustických předpovědi. ODEON používá metodu obrazového zdroje v kombinaci se sledováním paprsku. [13]

#### ODEON slouží pro posouzení:

- Koncertní a operní sály, divadla, kostely a mešity
- Velkoprostorové kanceláře, posluchárny, restaurace, hudební studia
- Podzemní a železniční stanice, letištní terminály
- Průmyslové prostředí, venkovní plochy s komplikovanou geometrií [13]

### 2.8.2. Hlavní funkce programu

Otevírá velké možnosti v měřicí technologii díky simulačním nástrojům. Není pro něj žádným problémem pracovat se složitými tvary. Umožňuje vytvářet bodové, lineární i všesměrové zdroje zvuku, na jejichž základě lze dokonale nasimulovat, jak budou dané prostory z pohledu akustiky fungovat.

Pomocí materiálové specifikace jednotlivých povrchů, jejich pohltivosti a odrazivosti je možné upravit měřené prostory tak, aby vyhovovaly normovým akustickým požadavkům.

### 2.8.3. Přístroje pro měření „v terénu“

Jako zdroj zvuku se používá **všesměrový zdroj, startovací pistole**. Účelem je vybudit takovou hladinu akustického tlaku, ze které lze získat křivky poklesu o požadovaném rozsahu bez vlivu hlukem pozadí. Podle druhů měření a měřené veličiny jsou na zdroj specifikovány požadavky na minimální hladinu akustického tlaku nad hladinu akustického tlaku pozadí, kterou je zdroj schopen vybudit.

Pozice zdroje se má volit tak, aby byla postižena charakteristická místa, kde se vyskytují přirozené zdroje zvuku. Pozice zdroje musí být zvoleny minimálně dvě. Výška středu zdroje se volí aspoň 1,5m nad podlahou.

**Mikrofony, záznamníky a analyzátory** se používají pro záznam sledovaných parametrů. Používají se všesměrové mikrofony, jejichž výstup je veden buď do systému pro zobrazení křivek poklesu, do analyzátoru pro odvození impulsových odezev nebo do záznamníku pro pozdější analýzu.

Mikrofony mají být situovány do míst, kde se budou běžně nacházet posluchači. Vzdálenost mikrofونů od sebe by měla být minimálně polovinu vlnové délky (obvykle asi 2m).

Vzdálenost mikrofونů od nejbližších odrazivých povrchů (stěn, podlah) by měla být minimálně čtvrtina vlnové délky (obvykle 1m). Jejich výška nad podlahou by měla u sálů pro poslech hudby a řeči být 1,2m, což odpovídá výšce ucha běžné sedící osoby.

Rozložení mikrofونů by mělo postihnout všechny možné výraznější rozdíly a jevy v sále.

### 2.8.4. Metody měření

- **Funkce „3D Billard“**

Metoda spočívá ve vysílání kulovitých vlnoploch od zdroje ve formě jednotlivých bodů (kuliček), které se od jednotlivých povrchů odráží a šíří prostorem. Při dopadu na povrch se část pohltí a část odrazí podle pohltivosti materiálu a zvolené či zakázané metody difúze. Tato funkce umožňuje množství nastavení. Lze zvolit rovinu, ve které se vysílá, případně vysílání ve všech směrech „3D Random“. Lze nastavit nebo zakázat způsob difúze („Lambert“, „Full Scatter“) při dopadu na povrch, velikost a počet

vysílaných „kuliček“ a vysílání lze také „krokovat“, pozastavit nebo vracet pro přesnější představu namísto volného šíření.

Tato funkce je vhodná i pro získání představy o šíření akustické energie v prostoru, její případné shlukování v určitých místech a odrazivosti jednotlivých povrchů.

Pokud se některé body dostanou mimo vnitřní geometrii modelu, znamená to, že model někde „netěsní“ a model je nutno opravit, případně změnit nastavení parametrů při importování modelu. *Obr. 29 Funkce 3D Billard viz kap. 2.9.4*

- **Funkce „3D Investigate Rays“**

Tato funkce spočívá ve vysílání paprsků různými směry od zdroje a jejich následný odraz při dopadu na jednotlivé povrchy. Část paprsků se odrazí a část je pohlcena podle pohltivosti zvoleného materiálu. I zde lze nastavit různé parametry, od počtu paprsků a počtu odrazů jednoho paprsku až po metodu zákaz difúze při dopadu.

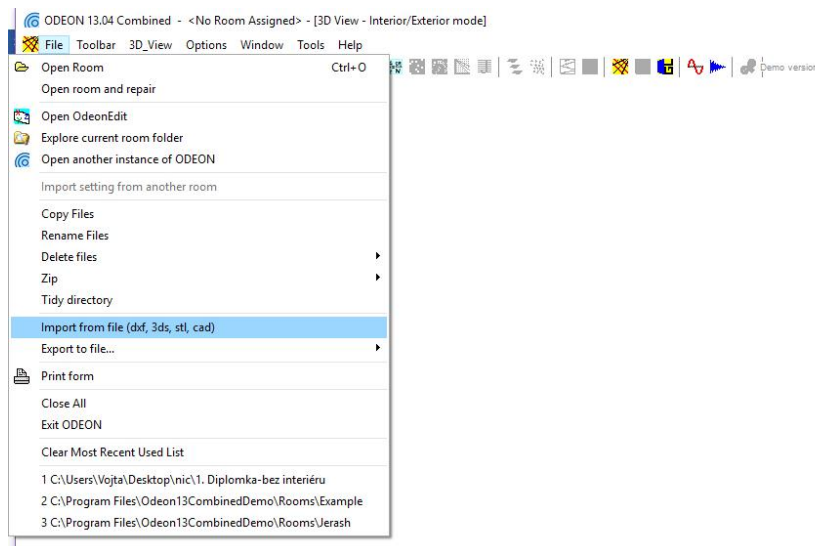
Podobně jako u předchozí metody, pokud některé paprsky opustí geometrii modelu, signalizuje to přítomnost „netěsnosti“ v modelu. *Obr. 27 Funkce 3D Investigate Rays viz kap. 2.9.4*

## **2.9. Manuál pro výpočet modelu v programu ODEON**

### **2.9.1. Spuštění programu**

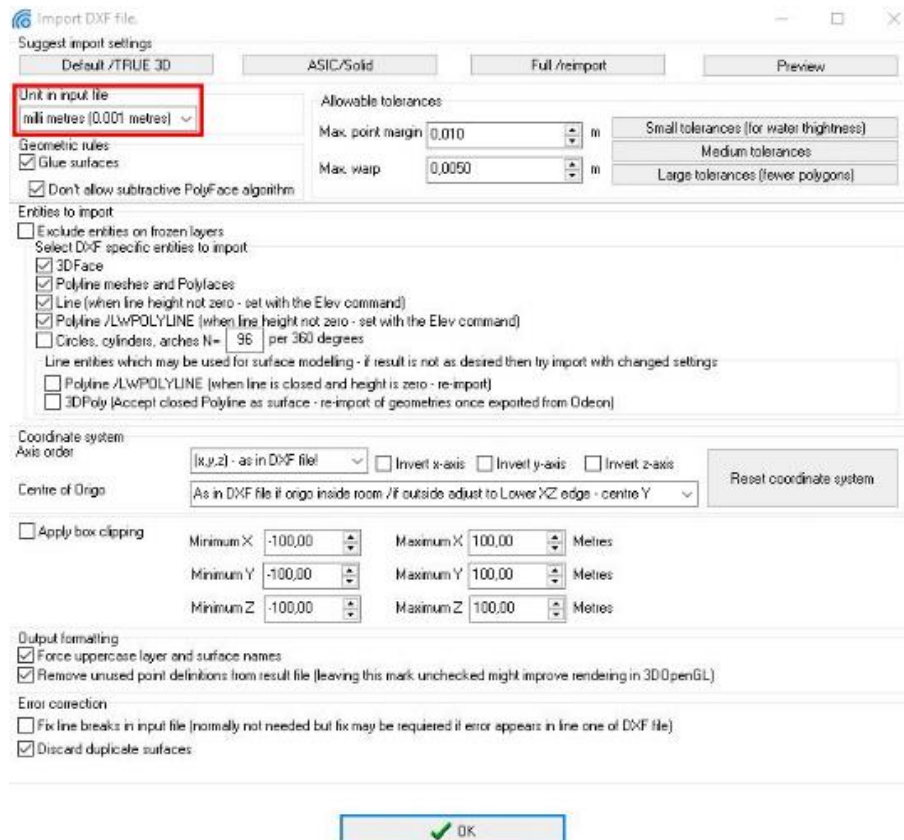
Při spuštění aplikace se otevře prázdné okno a my máme následně dvě možnosti, jak začít pracovat. První variantou je otevření již rozpracované práce pomocí File → Open Room (nebo zkratky Ctrl+O). V případě, že s programem teprve začínáte, je nutné, aby byl do aplikace vložen připravený model, pro jeho následné zpracování. Tento model, jak již bylo řečeno dříve, musí být se zkratkou dxf nebo jiné podporované 3D formáty z různých aplikací.

Pokud tedy chceme vložit nový model, docílíme toho přes File → Import from file, následně se otevře nové okno průzkumníka a my v počítači najdeme požadovaný soubor, který dáme otevřít.



Obr. 22 Import modelu do programu Odeon [12]

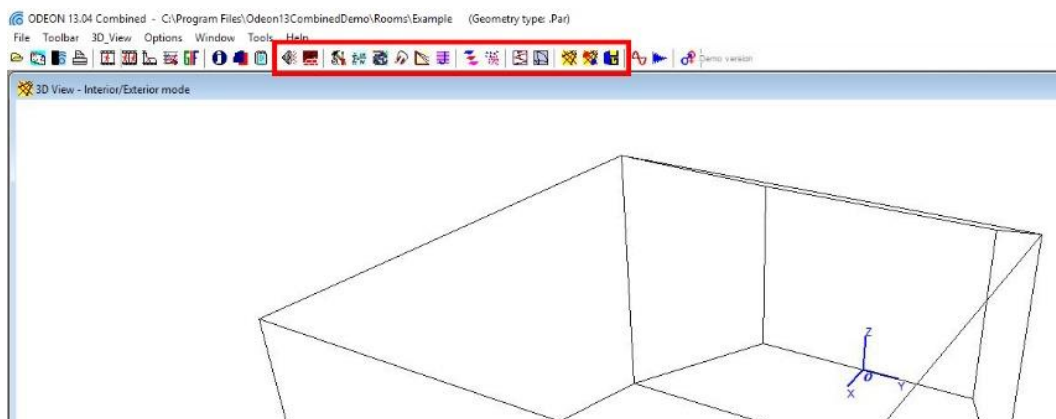
Následně se nám otevře dialogové okno, které nabízí základní nastavení pro import a následné zpracování daného modelu a práce s ním. Nás v tomto okně bude nejvíce zajímat zvýrazněná část *Unit in input file*, protože zde se nám nabízí velmi důležitá proměnná. Podle toho v jakých jednotkách jsme zpracovali svůj model, musíme vybrat jednotky i zde, jinak nebudou výpočty správné.



Obr. 23 Dialogové okno importu [12]

### 2.9.2. Základní lišta pro nastavení parametrů

Odeon má přehledné prostředí rozdělené do několika částí. V horní liště se nachází ikonky pro rychlé volby nastavení jednotlivých parametrů a dalšího nastavení. Nás budou zajímat ikonky ve zvýrazněném obdélníku, které si postupně projdeme a nastavíme si tak svůj model.

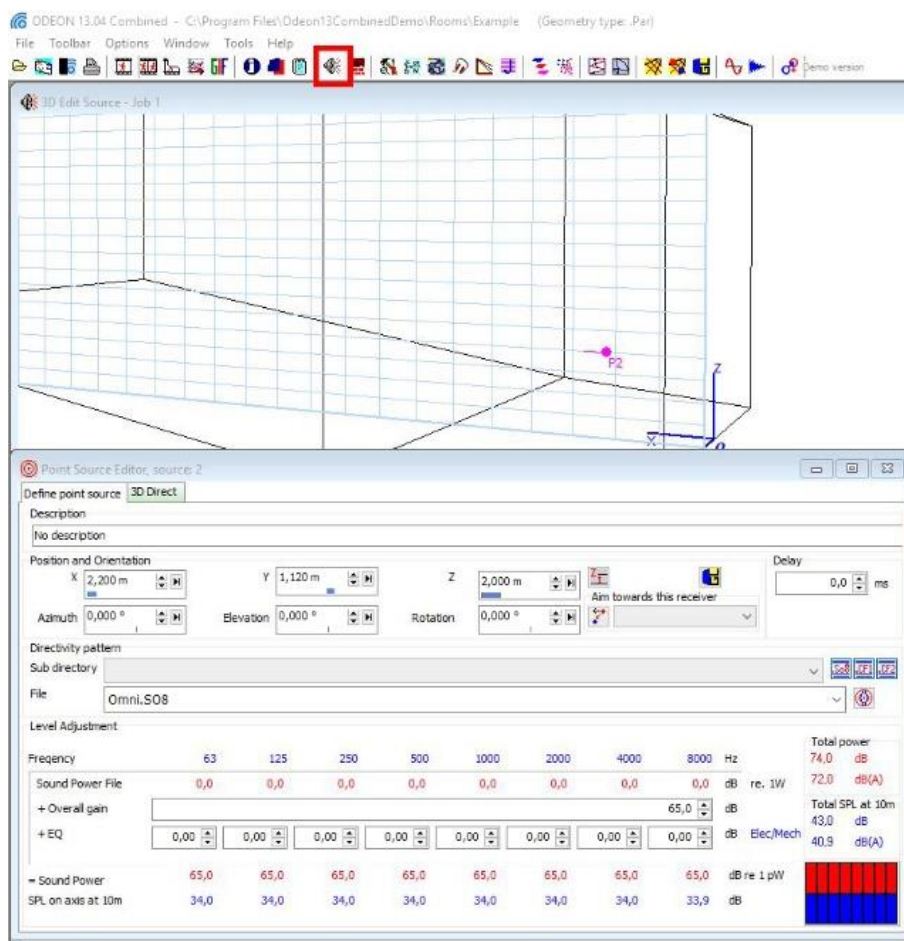


Obr. 24 Základní lišta pro nastavením parametrů [12]

### 2.9.3. Zadání zdroje a mikrofonu

- **Zadání zdroje**

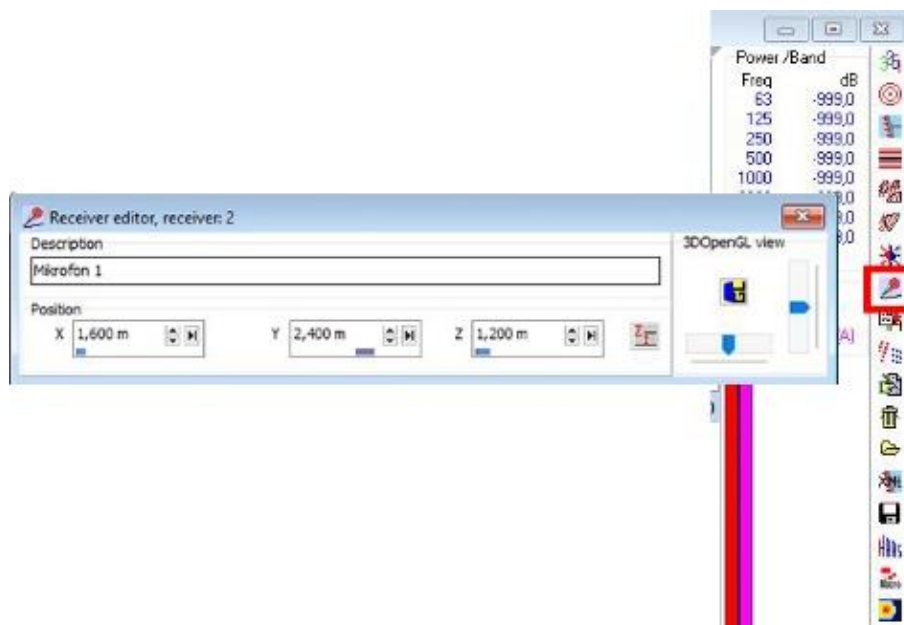
Jakmile máme načtený model, můžeme s ním začít pracovat. Jako první začneme s vytvořením zdroje zvuku. Po kliknutí na ikonu – *Source receiver list* se nám otevře nové okno, kde vybereme *Point Source Editor* a zde zadáme jednotlivé parametry pro nový zdroj. Zdroje si můžeme pojmenovat, abychom je rozpoznali. Následně určíme souřadnice, kde se zdroj bude nacházet, vybereme, o jaký typ zdroje se bude jednat. Pro všesměrový zdroj vybereme *Omni.SO8*. Nyní určíme sílu zdroje pomocí *Overall gain* v dB. Např. pro lidskou řeč je to 65dB. Zdroj lze však zadat i různými hodnotami v rámci posuzovaného spektra (EQ) na jednotlivých frekvencích.



Obr. 25 Point Source Editor [12]

- Zadání mikrofonu**

Další věc, kterou musíme v nastavení zdroje udělat je zadání mikrofonu, k čemuž slouží ikonka - *New receiver*, která nám otevře nové dialogové okno, a ihned vidíme, kde se mikrofon bude nacházet. Nastavení je mnohem jednodušší, zde stačí zadat pouze jméno a určit souřadnice.



Obr. 26 Receiver editor [12]

#### 2.9.4. Test těsnosti modelu

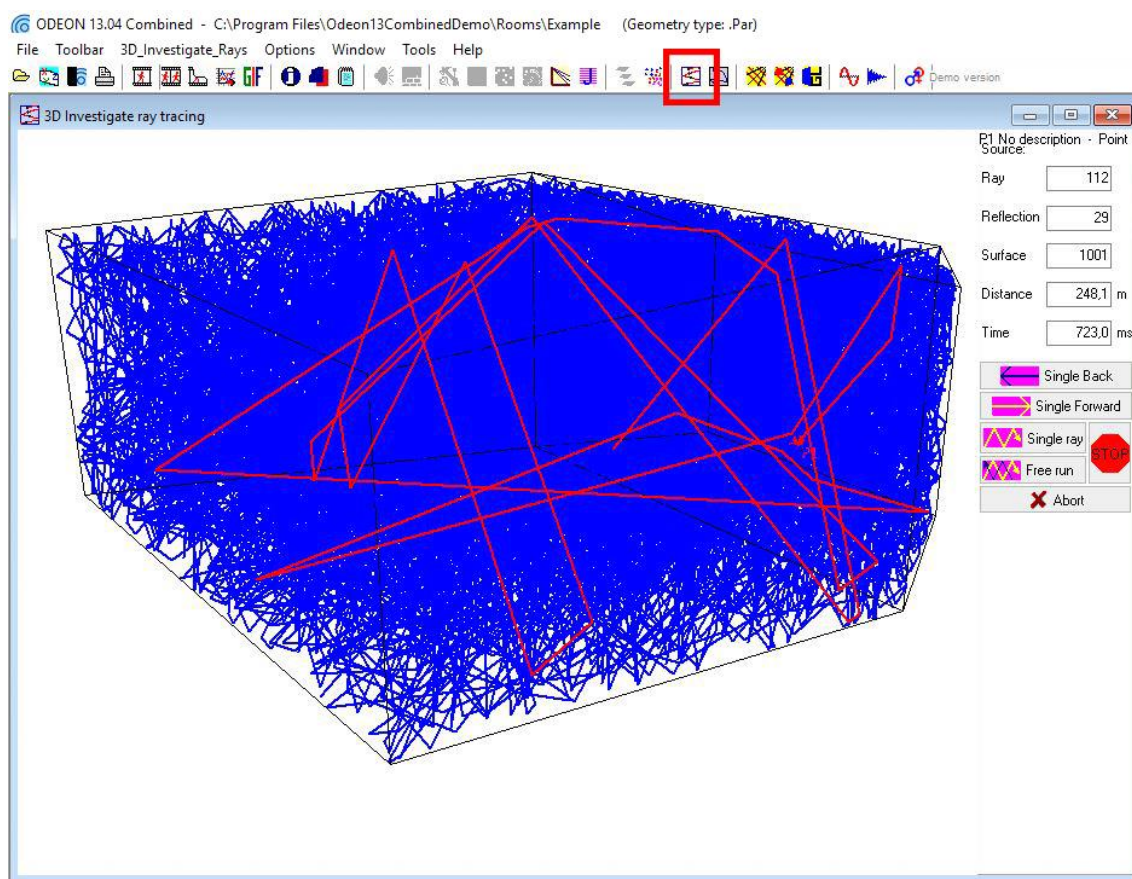
Dříve než začneme provádět všechna důležitá nastavení, je vhodné otestovat model na jeho těsnost, protože pokud se stane, že některá z jeho částí není dokonale utěsněna (model je vytvořen špatně) musíme se vrátit do aplikace, v níž jsme model vytvářeli a tento problém vyřešit a pak znovu načíst a otestovat.

Pro posouzení těsnosti modelu nám slouží dvě funkce popsané v kap. 2.8.4 Metody měření - *3D Investigate Rays* a *3D Billard*.

Tento postup děláme tak dlouho, než se nám podaří dosáhnout dokonale těsného modelu.

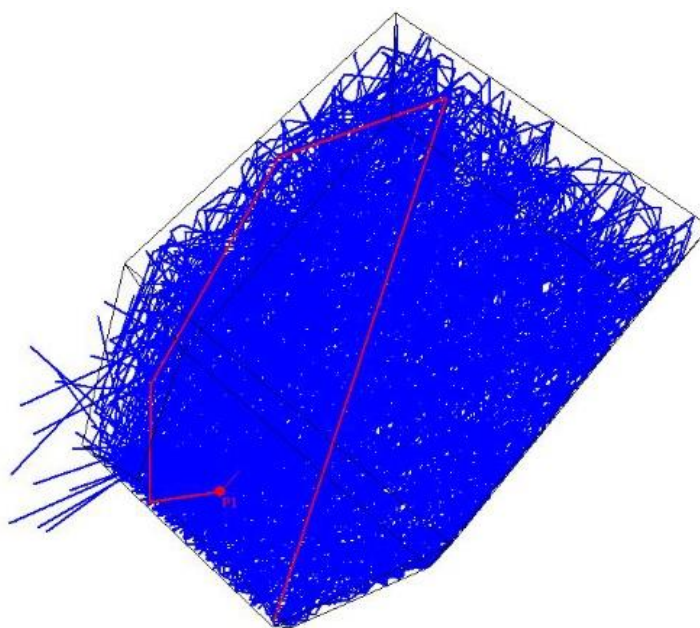
Funkce *3D Investigate Rays* nám zobrazuje paprsky vyzařované ze zdroje zvuku do všech směrů a odrážející se od jednotlivých ploch, tak dlouho, dokud se nezaplní celý prostor. Počet paprsků, které vyzařují, je zadán v *Room setup* → *Number of late rays* (kap. 2.9.6). Těsnosti modelu je dosaženo ve chvíli, kdy nám z něj nebudou unikat paprsky ven.





Obr. 27 Funkce 3D Investigate Rays [12]

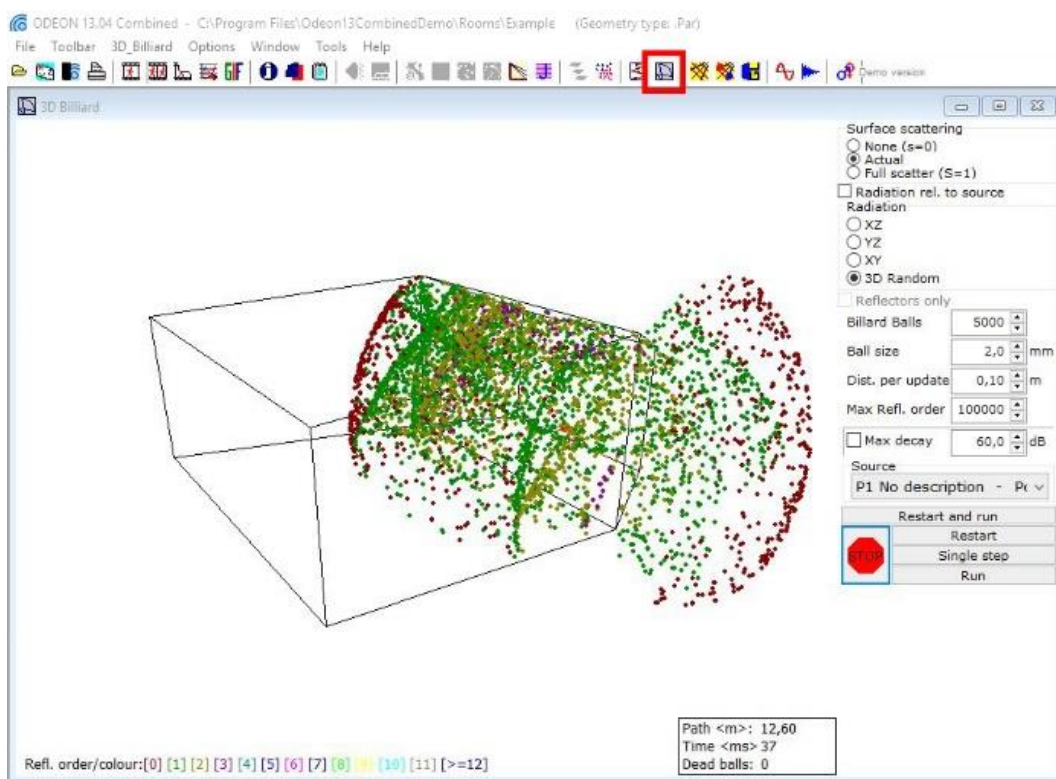
Pokud se stane, že model není utěsněn, zvuk se bude šířit mimo vnitřní prostory a nelze tak dosáhnout požadovaných výsledků.



Obr. 28 Funkce 3D Investigate Rays [12]

Funkce *3D Billard* nám pomocí kuliček ukáže, kudy se případný zvuk taky může šířit ven. Co všechno lze touhle funkcí zjistit a jak s ní pracovat je popsáno výše v *kap.*

#### 2.8.4 Metody měření.

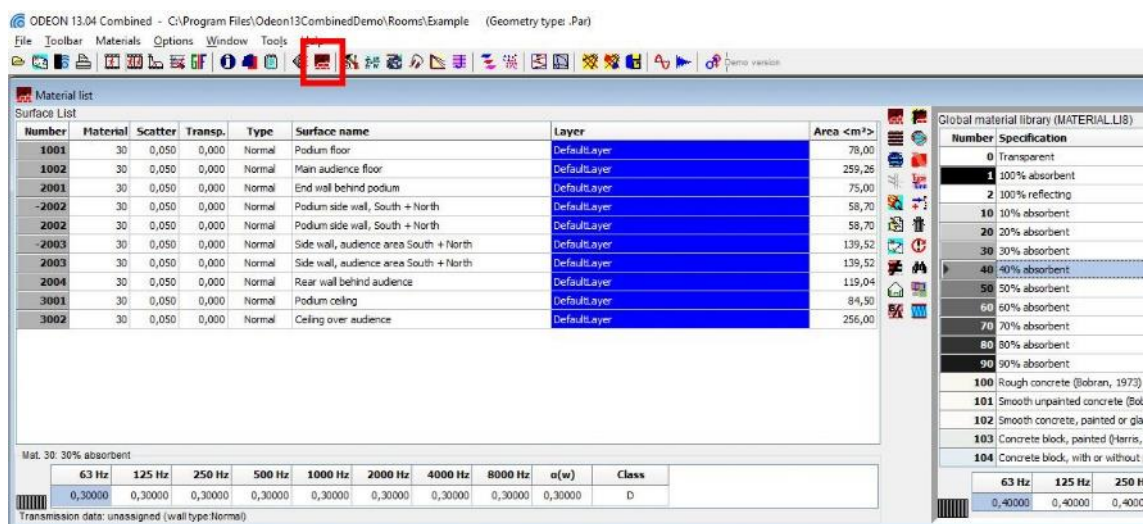


Obr. 29 Funkce 3D Billard [12]

#### 2.9.5. Přiřazení materiálů

Jakmile máme nastaveny zdroje a mikrofony, je potřeba přiřadit jednotlivým plochám materiály. Nastavení materiálů najdeme v horní liště pod ikonkou cihelné zídky – *Material list*.

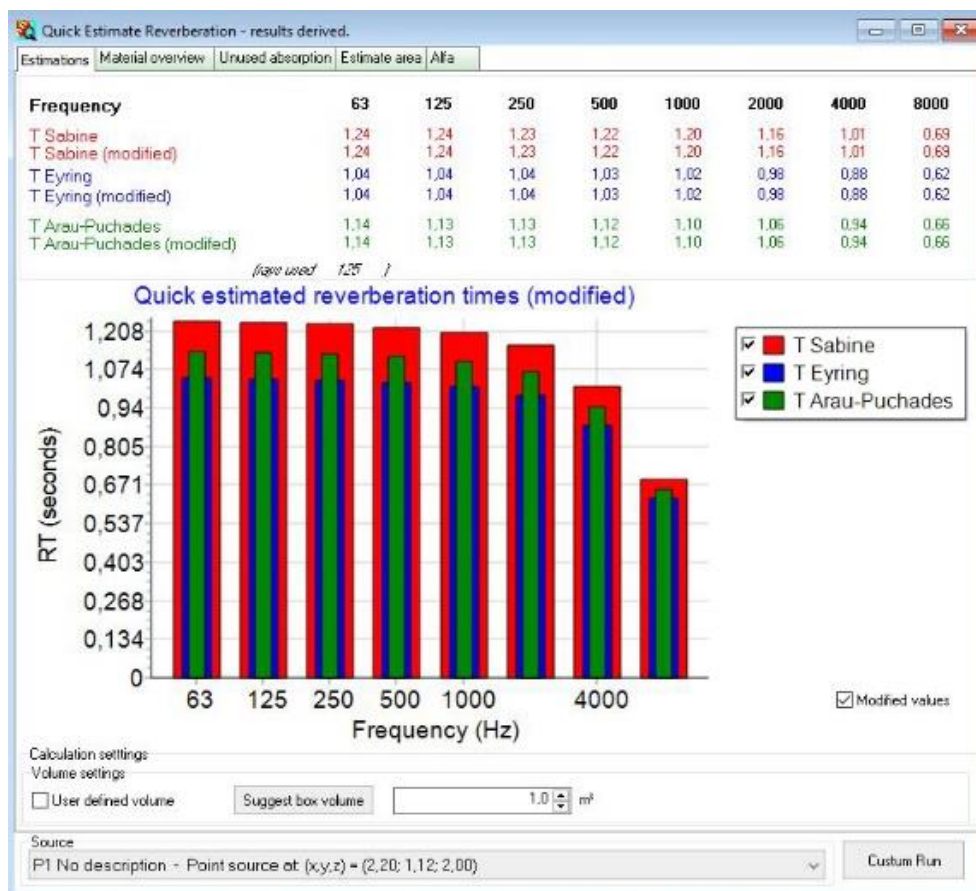
Materiály lze zadat globálně pro všechny plochy stejně nebo pomocí výběru ploch na levé straně lze přiřadit dané materiály jen jednotlivých částem objektu.



Obr. 30 Material list [12]

## 2.9.6. Rychlý odhad doby dozvuku

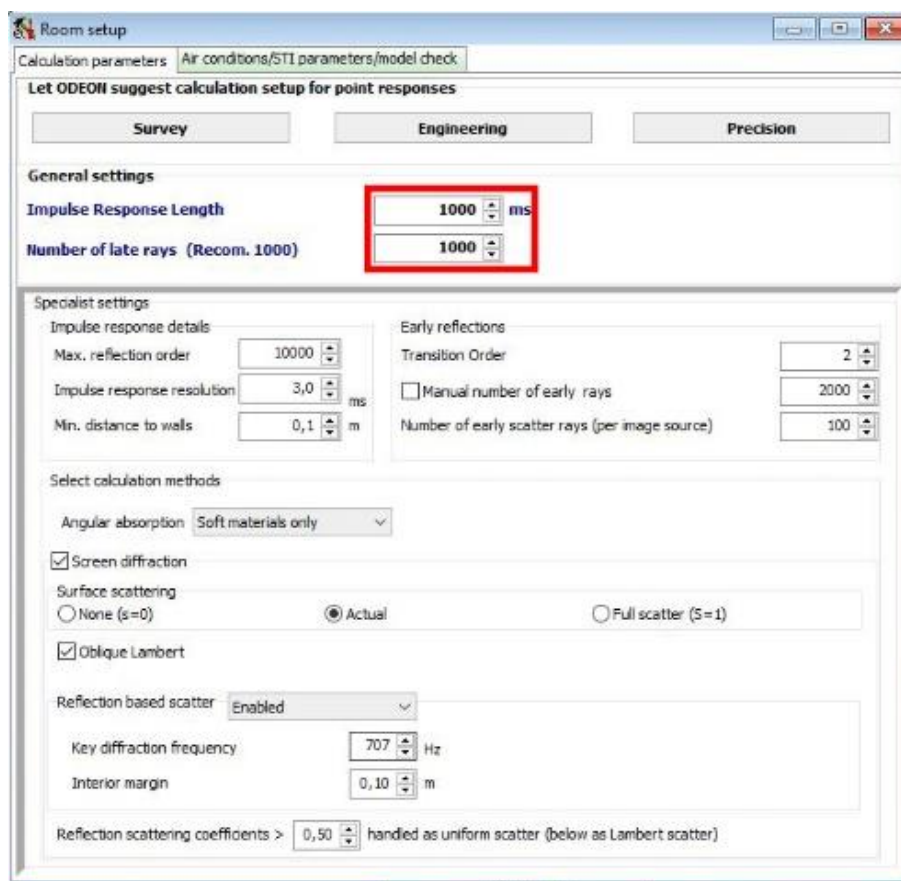
Díky funkci *Quick Estimate* v Material list je možné předběžně určit dobu dozvuku dle výpočtového modelu od Sabine a Eyringa. Tyhle hodnoty se nám budou hodit k určení odhadované doby dozvuku pro následné nastavení.



Obr. 31 Quick Estimate [12]

- **Nastavení odhadované doby dozvuku**

Zde nás zajímají dva parametry. První z nich je hodnota délky impulsní odezvy, která se zde zadává v milisekundách. Nastavení této hodnoty musí být alespoň 2/3 předpokládané doby dozvuku, jinak se stane, že na některých frekvencích budou nulové hodnoty, viz *Obr. 35 Global IT*.

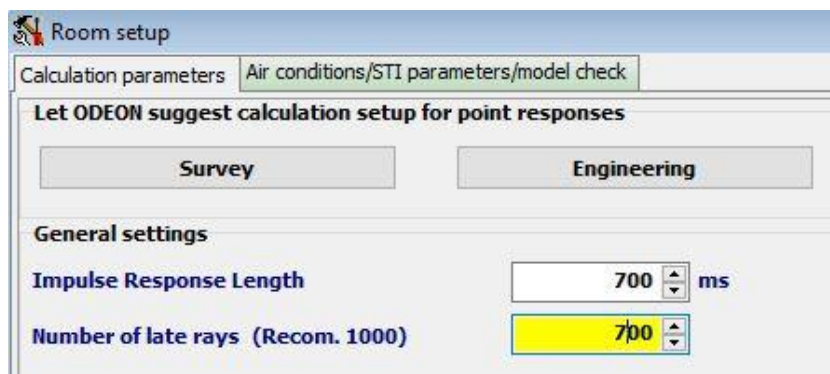


*Obr. 32 Room setup [12]*

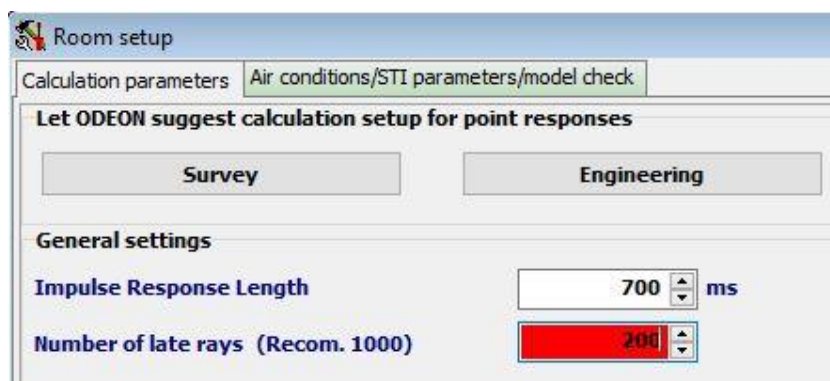
Druhý parametr nám určuje počet odrazivých paprsků. V závorce je doporučená hodnota pro danou výpočtovou metodu. Lze si zvolit ze tří metod. Orientační – *Survey*, Inženýrská – *Engineering* a Přesná – *Precision*. Každá z těchto metod nám doporučí jiný počet paprsků pro výpočet. Na jejich základě se taky odvíjí složitost, samozřejmě přesnost a doba výpočtu.

Pokud zadáme menší než doporučenou hodnotu, program nás na to upozorní. Žluté pole značí, že jsme zadali nižší hodnotu, s níž je možné dosáhnout konečných výsledků, ale jestliže kolonka zčervená, je to hodnota, která nám nezajistí kvalitní výpočet, viz následující obrázky:



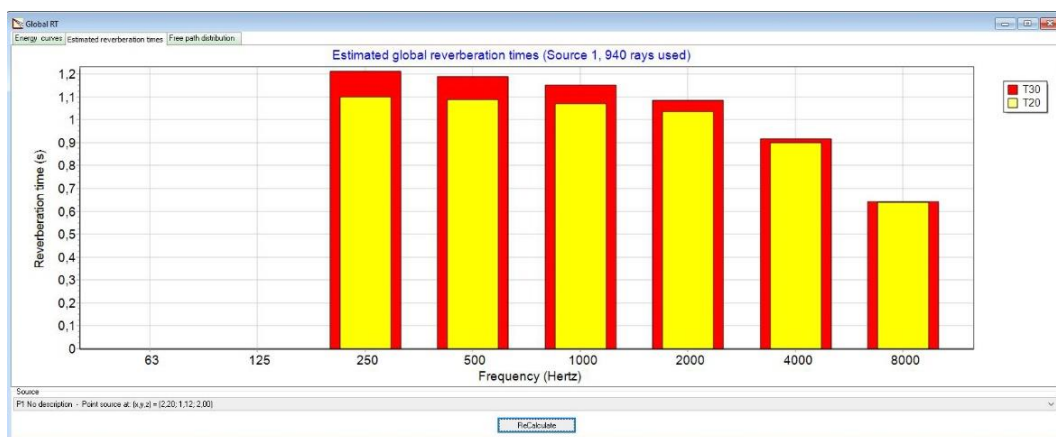


Obr. 33 [12]



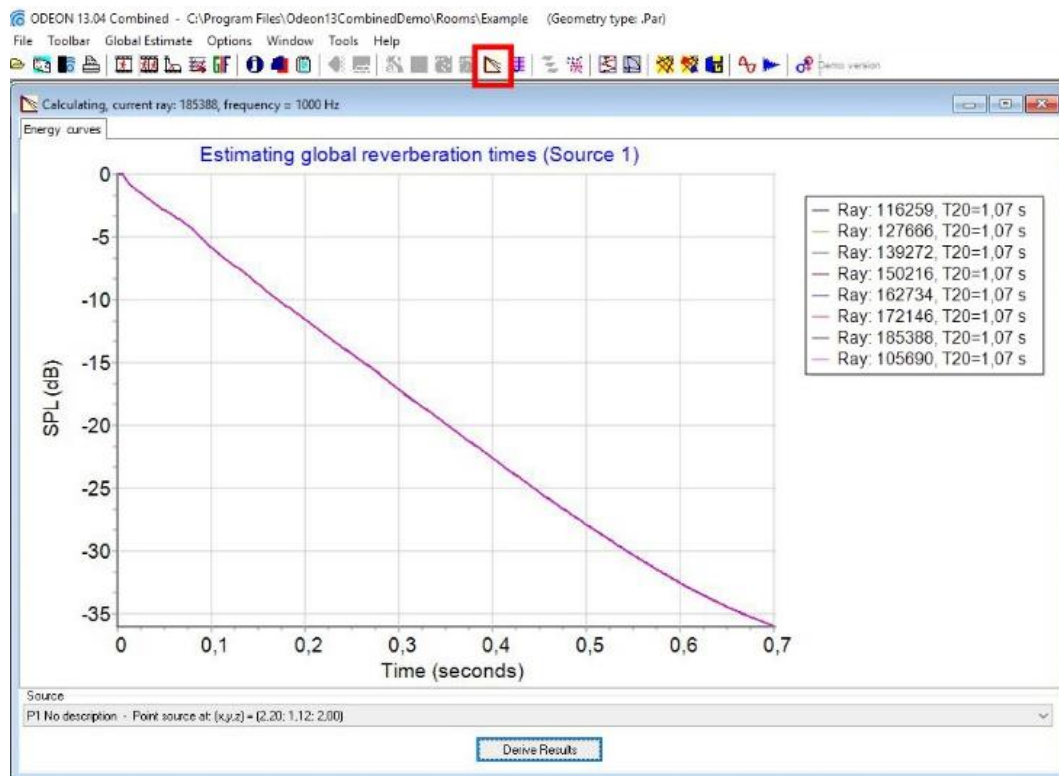
Obr. 34 [12]

Na následujícím grafu je vidět předběžný výpočet po dobu dozvuku. Jak je patrné z prvních dvou frekvencí 63 a 125 Hz, odhadovaná doba dozvuku nastavená v *Room setup* nebyla dostatečná (700ms), a proto zde program neukázal žádné výsledky. Je tedy nutné tuto hodnotu upravit a zkusit se podívat na tento graf znovu.



Obr. 35 Global IT [12]

Pro zobrazení grafu *Global IT* musíme najít v horní liště ikonku grafu *Global Estimate*, po jejímž zapnutí se nám spustí graf, který znázorňuje závislost hladiny akustického tlaku SPL (dB) na čase.



Obr. 36 Global Estimate [12]

Abychom dostali graf *Global IT*, musíme následně kliknout na tlačítko *Derive Results*, které nám v horní liště vytvoří novou záložku *Estimated reverberation times*, jak je vidět na obr. 35 *Global IT*.

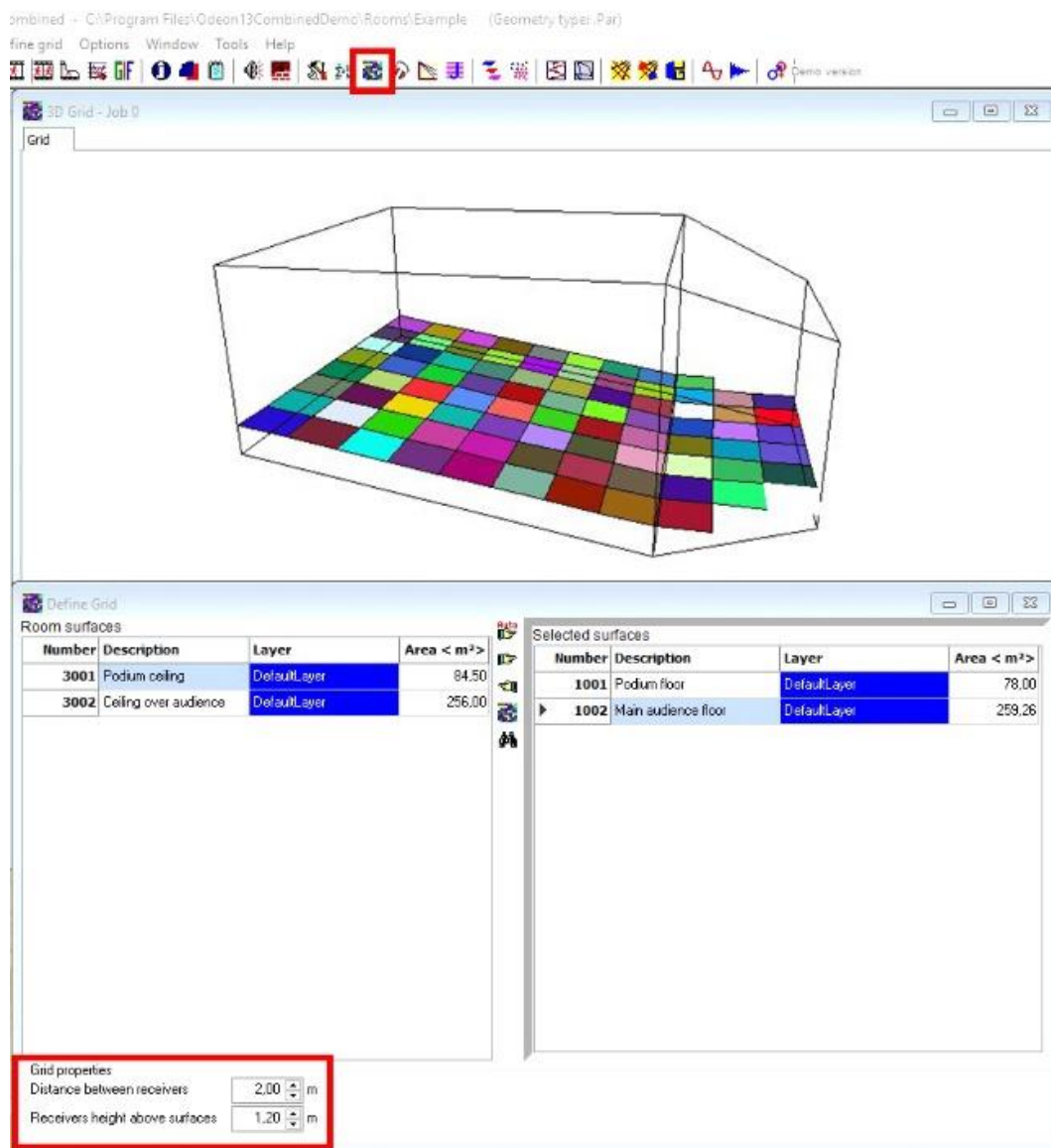
Pokud jsou všechny frekvence obsazeny a zobrazují dobu dozvuku, znamená to, že už se nemusíme vracet do *Room setup*, abychom opravili předběžnou dobu dozvuku.

### 2.9.7. Nastavení rastru výpočtového modelu

Pomocí ikony *Define Grid*, která má vzhled pixelového obrázku spustíme nastavení, pro zadání rastru podlahy, na jehož základě se nám zobrazí všechny výsledky. Čím hustší bude síť, tím preciznější a detailnější bude výpočet, avšak má to za následek delší dobu výpočtu, protože takovým zadáním se nám vloží do výpočtu mnohem více proměnných.

Na začátku je nutné nadefinovat plochy podlahy v tabulce *Define Grid* a následně pomocí stejné ikonky, která je i v této tabulce, můžeme zobrazit daný rastr.

Rastr nastavíme ve spodní části pomocí operátoru pro velikost jednotlivých čtverců a určíme výšku, ve které se bude rastr nacházet.



Obr. 37 Define Grid [12]

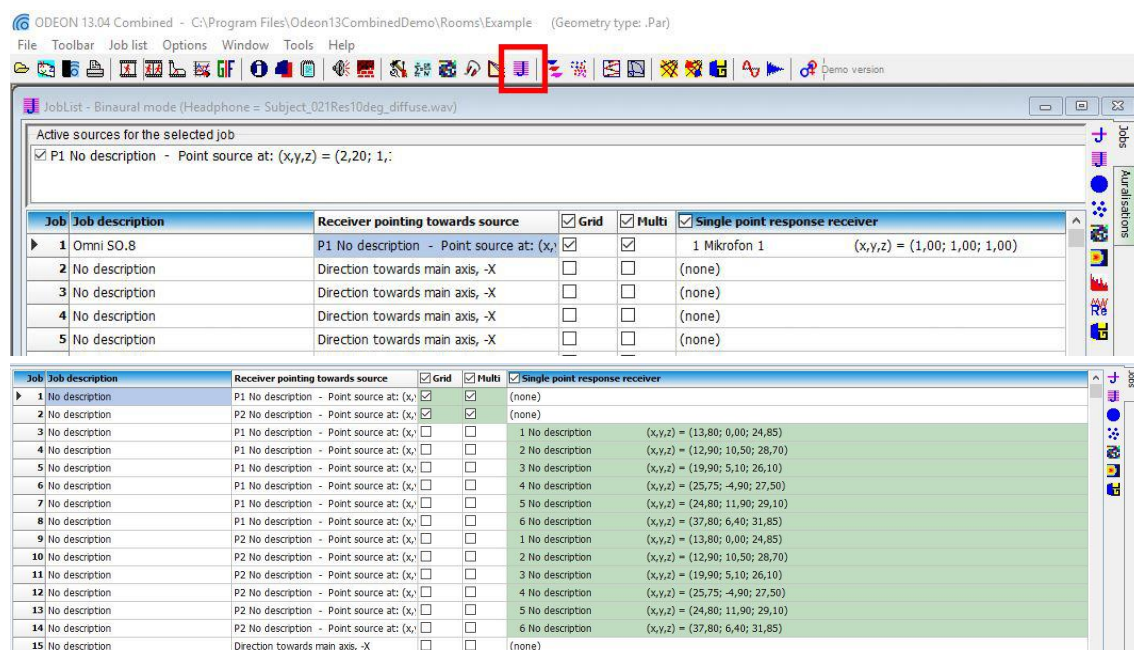
Tímto postupem jsme nastavily všechny důležité parametry pro výpočet všech výsledků, které chceme z aplikace Odeon získat. Nyní se tak můžeme dostat k poslední fázi a následně k výpočtům.

### 2.9.8. Nastavení výpočtu

Pomocí poslední ikonky, která nás pro výpočet zajímá, označené velkým písmenem J, se dostaneme do nastavení *Job list*. Zde před výpočtem provedeme poslední kroky nastavení, a pak to už necháme na programu, jaké výsledky nám s naším nastavením zobrazí.

Zde je potřeba si nastavit zdroj zvuku, se kterým chceme provést výpočet. Ve sloupci *Receiver pointing towards source* vybereme náš zdroj, v tomto případě P1. V prvním sloupci si můžeme zadat název našeho výpočtu a pak se podíváme na poslední sloupec *Single point response receiver*, kde si musíme vybrat mikrofon, který bude přijímat signál ze zdroje a v tomto místě provede vyhodnocení doby dozvuku. Bude-li jich více, můžeme získat průměrnou hodnotu ze všech mikrofonů.

Na závěr je potřeba zatrhnout *Grid*, pokud chceme počítat na mřížce a *Multi*, jestliže máme více mikrofonů, aby nám je zprůměroval, dle obr. 39

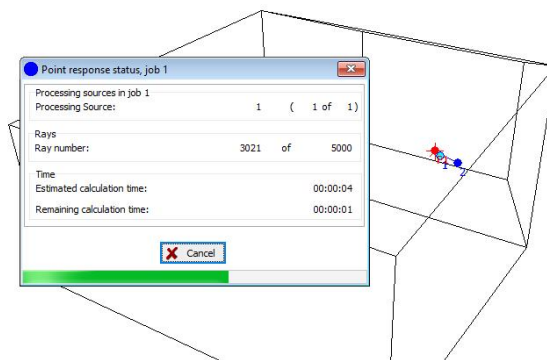


Obr. 38 a 39 Job list [12]

Jakmile tohle všechno nastavíme, můžeme spustit výpočet. Provedeme to opět ikonkou s písmenem J. Jak je ale vidět, jsou zde hned dvě. Ta první *Run single job* nám provede výpočet pouze pro jeden vybraný mikrofon. Pokud budeme mít nachystaných zdrojů a mikrofonů více, můžeme je všechny nechat spočítat pomocí druhé ikonky *Run all jobs*.

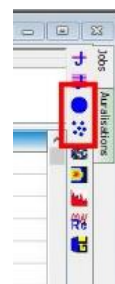
Nyní se nám otevře dialogové okno s výpočtem, kde je udáván čas, jak dlouho bude výpočet trvat.





Obr. 40 Výpočtové dialogové okno [12]

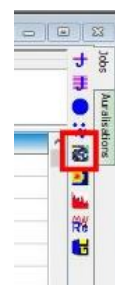
Jakmile bude výpočet dokončen, výsledky si můžeme zobrazit pomocí *View Single point response* pro jeden proces nebo *View Multi point response* pro zobrazení všech procesů.



Obr. 41 [12]

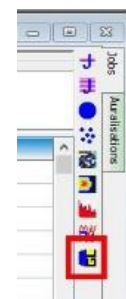
Abychom se mohli podívat na grafické zobrazení vyhodnocení, které nám ukáže v jakých místech daného prostoru se zvuk šíří ideálně, kde se shlukuje, kde je ho nedostatek aj. použijeme ikonku *View Grid response*.

Zobrazit můžeme zřetelnost, srozumitelnost, dobu dozvuku atd.



Obr. 42 [12]

A na závěr, chceme-li se podívat, jak vypadá umístění zdrojů v daném prostoru, použijeme poslední ikonku ve sloupci *3D OpenGL*.



Obr. 43 [12]

### 3. Cíle diplomové práce

Hlavním cílem mé diplomové práce je vhodný návrh akustických úprav a opatření sakrální stavby kostela v Brně na Lesné. U návrhu jde především o snížení doby dozvuku interiéru kostela na hodnoty optimální pro poslech hudby a mluvené slovo. Avšak kromě doby dozvuku je třeba dbát i na další kritéria prostorové akustiky, které jsou svým charakterem taktéž velmi důležitá a zastávají nemalou část, kterou vnímá lidské ucho a posunuje tím výstup poslechových kvalit.

Kromě doby dozvuku je důležitým parametrem pro posouzení srozumitelnost, která dokáže ukázat, v jakých místech daného prostoru je zvukový signál podáván v kvalitní míře, a kde naopak je ho nedostatek nebo přebytek. Program ODEON dále dokáže vyhodnotit další kritéria, jako např. míru jasnosti, počáteční dobu dozvuku nebo míru hlasitosti. Cílem je tedy dosáhnout optimálních hodnot těchto kritérií doby dozvuku a srozumitelnosti při obsazeném stavu prostoru kostela.

Jelikož se jedná o kulturní a společenský prostor s mimořádným přihlédnutím na duchovní stránku objektu, je nutné k celkovému konceptu návrhu přistupovat s etickým hlediskem na co nejšetrnější a pohledově nejprívětivější opatření.

Vzhledem k tomu, že kostel jako takový má svoji velkou dominantu v podobě kostelních zvonů, vytvořil jsem ve specializovaném programu Hluk+ 3D model okolní zástavby kolem kostela na Lesné a pomocí toho jsem tak vytvořil hlukovou studii, která dokáže zobrazit v jednotlivých hlukových pásmech, jaký bude mít tato novostavba kostela dopad pro obyvatele této části Brna.

V rámci své diplomové práce se zaměřením na projekční činnost jsem provedl návrhy hygienického opatření pro správné odvedení dešťové vody z propojovacího krčku mezi lodí kostela a stávajícím duchovním centrem. Vyřešení odvodnění kopule chrámové lodi a samotný návrh skladby dvouplášťové střechy. Dále návrh a posouzení skladby ploché střechy propojovací části kostela a duchovního centra. Návrh nosné konstrukce horního pláště střechy a systém ukotvení velkoformátového zasklení po obvodu kostela pod kopulí.

### **Zvolené metody výpočtu**

Pro návrh akustických úprav kostela jsem zvolil dvě výpočtové metody. Dříve než jsem začal pracovat v softwaru, provedl jsem ruční výpočet pomocí statistické metody v programu Microsoft Excel.

Na základě takto vypracovaného výpočtu jsem mohl, po vytvoření 3D modelu kostela, provést výpočet v ODEON Room Acoustick Program, kde jsem se dozvěděl, jak vypadá průběh doby dozvuku na základním návrhu bez úprav.

Dalším postupem bylo vytvoření vhodného návrhu akustických úprav, které jsem opět posoudil nejdříve pomocí ručního výpočtu v Microsoft Excel a následně jsem tímto návrhem opravil 3D model a výsledky jsem porovnal.

Pro hlukovou studii provedenou v programu Hluk+, jsem pomocí akustického tlaku znázorněného v jednotlivých polí Izofon zjistil, jak se hluk šíří a jak velký má dopad na okolní zástavbu.

## **4. Zvolené metody zpracování, postup zpracování řešené problematiky**

### **4.1. Vypracování modelu objektu a výběr softwaru**

V následujících podkapitolách vysvětlím problematiku vytvoření modelu kostela pro simulaci výpočtu. Déle ve stručnosti nastíním různé typy softwarů, ve kterých je možné model vytvořit. Popíšu, jakým způsobem jsem dospěl ke zjednodušení svého modelu, aby spolehlivě pracoval v simulačním programu ODEON.

V dalších kapitolách se už dostaneme k samotným výpočtům, nejdříve ručnímu, a pak softwarovému.

#### **4.1.1. Vytvoření 3D modelu v programu Google Sketchup**

Simulace chování akustických polí v uzavřených prostorech jsou velkým pomocníkem akustiků při navrhování jak obyčejných učeben a přednáškových sálů, tak hlavně složitých a náročných prostor. Příkladem mohou být nahrávací studia, kinosály, koncertní síně a v neposlední řadě taky právě kostely, které slouží pro setkávání mnoha věřících, kde zpěv a poslech hudby je velkou složkou liturgie.

Aby mohl akustik pracovat na projektu pro vytvoření akustické studie, návrhu opatření a komplexního posouzení daného objektu, musí tomu předcházet architektonický návrh.

Rád bych nyní uvedl jen pár obecných příkladů, s čím se musí akustik potýkat při úpravách daných prostor, aby byl návrh proveden dobře. Musí zajistit, aby se zpěváci či herci na jevišti slyšeli, zvuk se šířil s dostatečnou akustickou hladinou i do zadních prostor sálu a všech míst.

#### **Přehled možných softwarů:**

Jako hlavní předpoklad pro nasimulování posuzovaného prostoru je nutné, abych vytvořil ve vhodném softwaru 3D model. Pro takovou práci existuje velké množství programů. Pro stavaře jistě dobře známý AutoCad, který ve vyšších verzích umí pracovat s prostorovými tělesy. Avšak modelovat v tomto programu ve 3D prostoru není zrovna

jednoduché. Dále se nabízí SolidWorks, který je ale náročný a práce s ním vyžaduje velkou dávku zkušenosti, znají ho spíše strojaři. Velmi oblíbený software pro modelování prostorových těles a objektů je Rhinoceros, který se vyučuje i na naší fakultě jako volitelný předmět. Dále to může být architektonický program ArchiCad. V poslední řadě pro vytvoření 3D modelu můžeme zvolit samotný akustický program ODEON, ve kterém se model dá vytvořit. Modelování je natolik složité, že ani paní ing. Fišarová, která má s tímto programem zkušenosti, mi to nedoporučila a sama v něm modely nevytváří.

Já jsem si pro svou práci a vytvoření 3D modelu vybral software Google Sketchup, který nabízí příjemně přehledné pracovní a uživatelské prostředí, mnoho online návodů a především je v nižších verzích jeho licence zdarma. Tvůrci programu se zaměřili na jednoduchost pro své uživatele. Program svým vzhledem připomíná „Malování“ z OS Windows, které jistě každý zná. Hlavním předpokladem pro jeho výběr a práci byla taky kompatibilita ODEON.

### **3D model a komplikace spojené se softwarem:**

Abych se dopracoval k finální verzi modelu, se kterým by bylo možné efektivně pracovat, a který mi Odeon Room Acoustics otevřel v téměř celém svém rozsahu, musel jsem spoustu prvků v modelu zjednodušit.

Na začátku jsem měl k dispozici model vytvořený architekty z firmy Atelier Štěpán, který byl na tolik komplikovaný, že Odeon měl problém jej vůbec načíst, a když se to podařilo, chyběla zde spousta prvků, jako například kopule s horní částí prstence oken.

Následující tabulka zobrazuje porovnání základního modelu od architektů s modelem, se kterým jsem provedl výsledný výpočet.

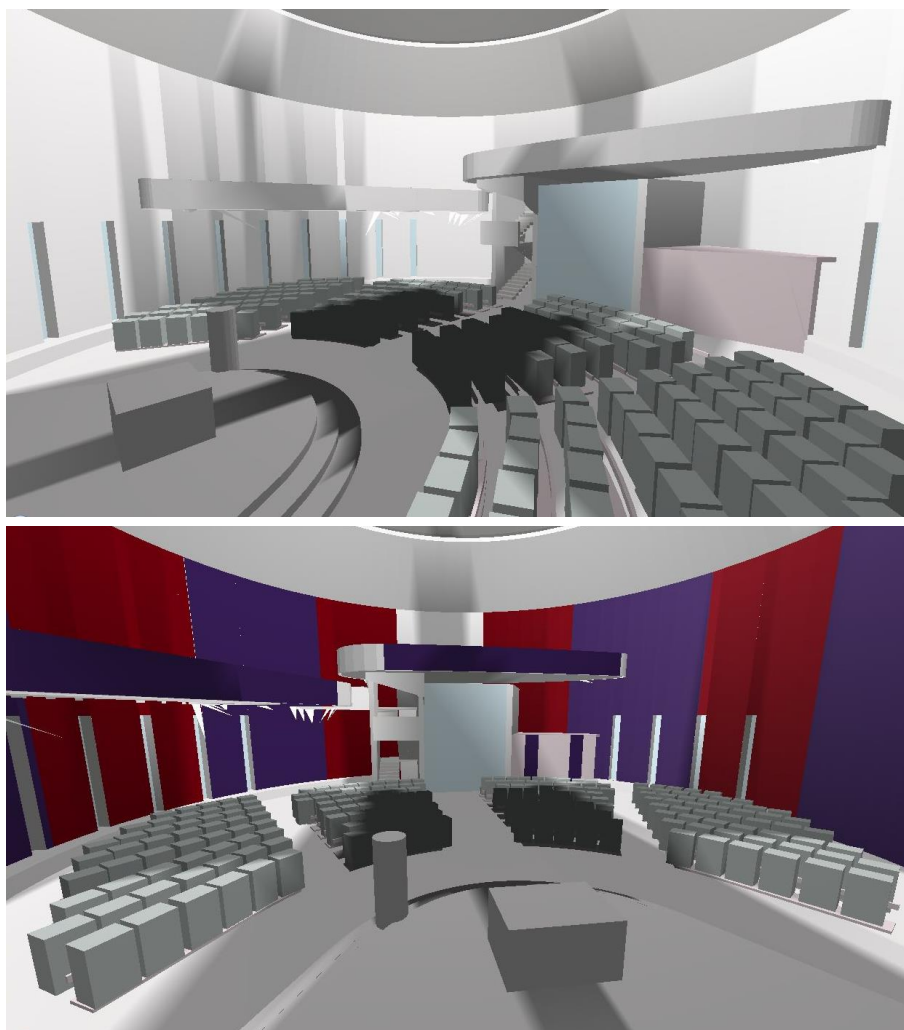
*Tab. 5: Srovnání vytvořených modelů [autor]*

<b>Model</b>	<b>Počet entit</b>	
	<b>Sketchup</b>	<b>Odeon</b>
Atelier Štěpán	32250	11360
Čistý interiér	2460	1350
Finální verze	16220	5270

Jak jsem již předepsal, nebylo jednoduché dosáhnout kvalitního modelu, se kterým by se dalo pracovat. Velký vliv na tom měla verze samotného programu Odeon Room Acoustics 8.5. Měl jsem komplikace s kopulí, kterou jsem musel několikrát zjednodušit, aby ji program načetl a nevytvořil díru ve střeše. Ani po opakovaných úpravách podhledů kůrů, které tvoří skořepiny, jsem nedosáhl výsledku, aniž by je program nezrušil. Celý výpočet je tedy proveden bez těchto dvou velkých prvků, které jistě z velké části ovlivňují výslednou akustiku.

Vzhledem k tomu, že ve škole byla k dispozici verze programu 8.5, kde se model plně nezobrazil, zkusil jsem z oficiálních stránek stáhnout nejnovější verzi programu (v13.0), která je pouze v demo verzi. Zde se model načetl celý, a tak jsem zjistil, že problém nebyl v tvaru daných prvků, ale ve verzi programu.

Na následujících obrázcích je vidět model kostela, se kterým jsem počítal, bohužel bez podhledů kůrů, ze kterých zbylo jen pár trojúhelníkových ploch.



*Obr. 44 a 45 Interiér kostela bez a s akustickými obklady [autor]*

#### 4.1.2. Instalace a samotná práce ve Sketchupu

Po stažení a instalaci aplikace je nutné si při jejím prvním spuštění zvolit šablonu pro práci v samotném programu, i když je možné si ji změnit i během jejího užívání. Nejde o žádné složité nastavení, protože to co zde vybírám, jsou především jednotky, ve kterých budu pracovat. Pro moji práci jsou nejvhodnější milimetry, ve kterých jsou vypracované půdorysy a řezy. Nebudu zde detailně rozvádět, jak pracovat v samotném programu, protože pro tyto účely slouží návody, které jsou součástí samotné aplikace, ale poukážu na důležité aspekty pro správnou funkci modelu po jeho následném importu do programu ODEON.

1. Odeon Room Acoustics Program nedokáže přečíst žádný objekt, neumí s těmito prvky pracovat a proto je nutné na začátku práce smazat zobrazenou postavu, která se vyskytuje ve styku os x,y,z. Jeho funkce při modelování nabývá jen jednoho významu – zorientovat se v prostoru.
2. Nesmí docházet k vzájemnému překrytí dvěma čarami. Kdyby se tak stalo, je lepší vše smazat a čáru nakreslit znovu.
3. Program v samotném počátku pracuje pouze v 2D prostoru, ze kterého následným postupem dostanu prostorové obrazce, k čemuž slouží nástroj *vytáhnout*, a tak z obyčejného čtverce dostanu v pár vteřinách krychli.
4. Jak jsem se již zmínil, ODEON neumí pracovat s objekty a proto, kdybych náhodou převedl model z jiné aplikace do Sketchupu a byly zde stěny aj. je nutné tyto prvky rozložit na jednoduché čáry a plochy. Navíc ODEON pro svou simulaci využívá pouze vnitřní prostor, a tak každá čára a plocha navíc znamená složitější model, více prvků a delší čas potřebný k jeho načtení a práci.
5. A na závěr je potřeba, aby plochy měly přidělenou barvu povrchu. Nemusí být zrovna přesná barva daného materiálu. V ODEONu se totiž materiály následně přiřazují podle jednotlivých barev.

Po úspěšném vytvoření modelu už jen stačí provést export do patřičného 3D formátu dxf a ten importovat do Odeon Room Acoustics Program, kde začíná nová práce s tímto modelem.

## 4.2. Základní informace o měřeném objektu

Kostel jako takový, bude využíván především pro bohoslužby, v ojedinělých případech pro kulturní účely, jako například koncert. Nejvyšší počet osob pro obsazení kostela je navržen na 400 osob. Při obsazení osob v modelu kostela se mi podařilo umístit 230 osob, proto jsem i ruční výpočet koncipoval s touto hodnotou, abych měl ve shodě základní údaje pro výpočet.

Kostel je půdorysně tvořen jako válec s průměrem 23,8m. V přední části se nachází vyvýšené kněžiště. V celém prostoru je navržena podlaha z mramoru. V zadní části kostela se nachází kůry pro varhany a zpěváky, které jsou navrženy jako trub lodi (spodní část je skořepina; není zde rovný strop). Stěny i kůry jsou železobetonové a jejich povrchovou úpravou je omítka. V oblasti kruhového okna, ve výšce 12,25 m, je po obvodu navržen betonový prstenec, který má sloužit nejen pro nepřímé vedení světla, ale taky pro účely akustiky. Střecha je navržena jako asymetrická kopule z betonu.

Podrobnější rozměry a uspořádání kostela je možné najít v příložených výkresech navrženého stavu kostela, viz přílohy A - *Přípravné a studijní práce*.

### Dostupné podklady pro zpracování:

Jako podklad pro zpracování mé diplomové práce mi byla poskytnuta výkresová dokumentace v Autocadu od firmy Atelier Štěpán a následně i jejich 3D model kostela, podle kterého jsem vytvořil ten svůj.

### Předběžný pohled na objekt kostela z hlediska prostorové akustiky

Protože interiér kostela je tvořen výhradně materiály s velkou odrazivostí, bude nejspíš potřeba, aby stěny byly obloženy akustickými rezonátory, pro účely zlepšení akustické pohody a doby dozvuku při šíření zvukového signálu. Materiály potřebné pro toto opatření budou navrženy po prvotních výpočtech, které jasně ukáží, na jakých frekvencích je nutné zvuk utlumit.



### 4.3. Ruční výpočet pomocí aplikace Excel

Dříve, než jsem začal pracovat s modelem kostela a následně se softwarem pro výpočet všech důležitých akustických proměnných v Odeon Room Acoustics Program, provedl jsem předběžný výpočet pomocí aplikace MS Excel na základě výpočtů dle *CH52 - Prostorová akustika* a *CH01 - Stavební akustika a denní osvětlení budov* ve shodě s normou ČSN 73 0525, 26, 27 – Prostorová akustika, a ČSN EN 12354-6 - Výpočet akustických vlastností.

Průběh doby dozvuku  $T$  (s) se stanovuje na kmitočtovém rozsahu k optimální době dozvuku  $T_0$  (s) a prověřuje se pomocí kmitočtové závislosti přípustného rozmezí poměru hodnot  $T/T_0$ .

Dle normy [5] lze určit optimální dobu dozvuku  $T_0$  (s) v závislosti na objemu  $V$  ( $m^3$ ) pro varhanní hudbu uvedenou křivkou č. 2 na obr. A.1 v této normě. Tato závislost je dána pro pro víceúčelové sály, zkušebny orchestru a sboru. Protože tahle norma nestanovuje křivku pro kostely (varhanní hudbu) jako je tomu v normě [7] na obr. A.1, byl jsem nucen volit dle svého uvážení nejbližší z možných variant. Norma [7] naopak nestanovuje následující vzorec pro výpočet optimální doby dozvuku  $T_0$  (s).

$$[5] \quad T_0 = 0,3582 \cdot \log V - 0,061 \quad (s) \quad (4.1)$$

Pro objem kostelu  $V = 6950 \text{ m}^3$  je vypočítaná hodnota optimální doby dozvuku dle daného vzorce  $T_0 = 1,315 \text{ s}$ .

Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku  $T/T_0$  obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu oktavového pásma jsou na obr. 10.

- Vstupní data:**

*Tab. 6: Součinitel útlumu  $m$  ( $m^{-1}$ ) v oktavových pásmech v závislosti na teplotě a vlhkosti. Pro prostory kostela s relativní vlhkostí 55% a vnitřní teplotou 15°C [9]*

Hz					
125	250	500	1000	2000	4000
0,0001	0,0002	0,0005	0,0008	0,0018	0,0059

Abychom odvodili ekvivalentní pohltivou plochu pro daný prostor kostela, je zapotřebí použít následující vztahy:

$$A = \Sigma A_i + A_{\text{sir}} \quad \text{m}^2 \quad (4.2)$$

kde  $\Sigma A_i$  je ekvivalentní pohltivá plocha jednotlivých objektů v  $\text{m}^2$ ,

$A_{\text{sir}}$  ekvivalentní pohltivá plocha pro pohlcování zvuku ve vzduchu v  $\text{m}^2$ ,

$$A_{\text{sir}} = 4mV \cdot (1-\psi) \quad \text{m}^2 \quad (4.3)$$

kde  $m$  je součinitel útlumu v  $\text{m}^{-1}$ ,

$V$  objem v  $\text{m}^3$ ,

$\psi$  poměrný objem objektů

$$\psi = \frac{\Sigma V_{\text{obj},j} + \Sigma V_{\text{obj},o}}{V} \quad \text{m}^2 \quad (4.4)$$

kde  $\Sigma V_{\text{obj},j}$  je objem lavic v  $\text{m}^3$ ,

$\Sigma V_{\text{obj},o}$  objem osob v  $\text{m}^3$

$V$  celkový objem v  $\text{m}^3$

$$\Sigma V_{\text{obj},o} = \frac{70}{1100} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}/\text{m}^3} \right] = 0,064 \text{ m}^3$$

$$\Sigma V_{\text{obj},j} = 1,5 \text{ m}^3$$

$$\psi = \frac{32 \cdot 1,5 + 400 \cdot 0,064}{6950} = \mathbf{0,01075}$$

V následující tabulce je proveden výpočet doby dozvuku pro řešený kostel se základními parametry navrženého stavu bez úprav.

Pro jednotlivé materiály bylo nutné spočítat ekvivalentní pohltivou plochu  $A_i$  ( $\text{m}^2$ ) jako součin plochy daného materiálu  $S$  ( $\text{m}^2$ ) a činitele pohltivosti zvuku  $\alpha_i$  [-] na jednotlivých frekvencích.

V dalším kroku bylo nutné vypočítat celkovou pohltivou plochu  $A_{\text{celk}}$  ( $\text{m}^2$ ) za pomoci výpočtu (za pomoci výpočtu (4.2)).

Na základě této celkové pohltivé plochy jsem mohl vypočítat počáteční dobu dozvuku danou vzorcem:

$$T = \frac{55,3}{c_0} \cdot \frac{V(1-\psi)}{A} \quad (4.5)$$

kde  $c_0$  je rychlost zvuku ve vzduchu v m/s,

(poměr  $55,3/c_0$  je dle EN ISO 140-4 roven 0,16. Rychlost zvuku 345,6 m/s)

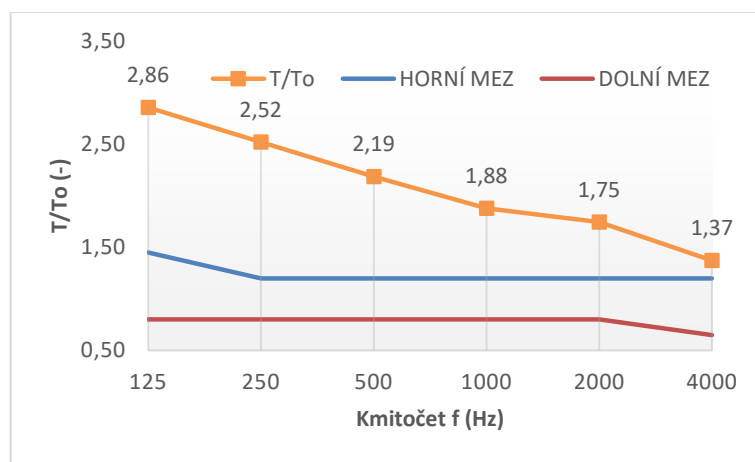
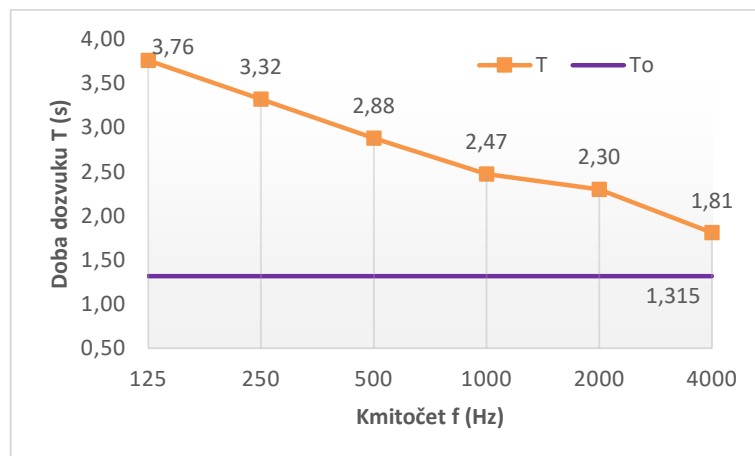
Tab. 7: Výpočet doby dozvuku pomocí MS Excel [autor]

MATERIÁL	S [m²]	$\alpha_i/A_i$	KMITOČET [Hz]					
			125	250	500	1000	2000	4000
Stěny- omítka s malbou	911,81	$\alpha_i$	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
		$A_i$	9,12	9,12	9,12	18,24	18,24	27,35
Podlaha- mramor	452,16	$\alpha_i$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
		$A_i$	4,52	4,52	9,04	9,04	13,56	13,56
Okna- izolační dvojsklo	150,20	$\alpha_i$	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
		$A_i$	18,02	12,02	7,51	6,01	4,51	3,00
Dveře- skleněné	35,00	$\alpha_i$	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
		$A_i$	4,90	3,50	2,80	2,80	2,80	2,80
Strop- betonová skořepina	314,00	$\alpha_i$	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
		$A_i$	3,14	3,14	3,14	6,28	6,28	12,56
Lavice	170,00	$\alpha_i$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
		$A_i$	10,20	13,60	17,00	20,40	23,80	27,20
Osoby	400,00	$\alpha_i$	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90
		$A_i$	240,00	280,00	320,00	360,00	360,00	360,00
$\Sigma=$	2433,17	$\Sigma A_i$	289,90	325,90	368,61	422,77	429,19	446,48
$A_{\text{sir}} = 4mV(1-\psi)$			2,75	5,50	13,75	22,00	49,50	162,26
$A_{\text{celk}} = A_i + A_{\text{sir}}$			292,65	331,40	382,36	444,77	478,69	608,74
$V = 6950 \text{ m}^3$	$T=0,16.V(1-\psi)/A$		3,76	3,32	2,88	2,47	2,30	1,81
$T_o =(0,3582 \cdot \log V) - 0,061$		$T_o$	1,315	1,315	1,315	1,315	1,315	1,315
$T/T_o$			2,858	2,524	2,187	1,881	1,747	1,374
HORNÍ MEZ			1,450	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
DOLNÍ MEZ			0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,650

V následující tabulce jsou shrnuty výsledné hodnoty, a jak je patrné z příloženého grafu odvozeného z těchto výsledků, kostel nesplňuje normové požadavky na dobu dozvuku  $T$  (s) a je nutné navrhnout příslušná opatření ke snížení doby dozvuku.

Tab. 8 Doba dozvuku dle statistického výpočtu [autor]

f (Hz)	T (s)	T <sub>o</sub> (s)	T/T <sub>o</sub> (-)	Mez	
				Horní	Dolní
125	3,76	1,315	2,86	1,45	0,80
250	3,32	1,315	2,52	1,20	0,80
500	2,88	1,315	2,19	1,20	0,80
1000	2,47	1,315	1,88	1,20	0,80
2000	2,30	1,315	1,75	1,20	0,80
4000	1,81	1,315	1,37	1,20	0,65

Graf 1 Průběh doby dozvuku  $T/T_o$  v závislosti na stanovených mezích [autor]Graf 2 Průběh počáteční doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_o$  (s) [autor]

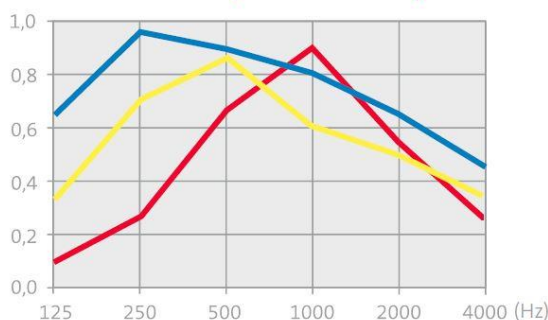
- **Návrh akustických opatření**

Po zjištění těchto výsledků je nutné provést akustické opatření v podobě navržení vhodných akustických rezonátorů, abych dosáhl utlumení doby dozvuku kostela a dostal jsem se do mezí stanovených normou [5]

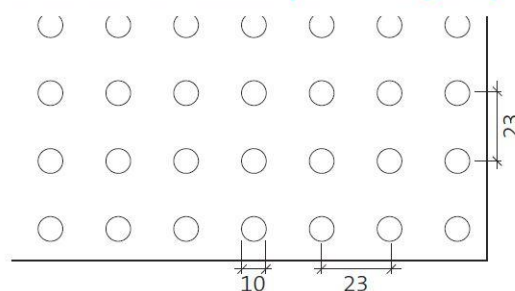
Jako nejefektivnější se mi zamlouvalo použít akustických obkladů stěn, které v kostele zabírají největší plochu, a tak by bylo možné jejich zaplněním vytvořit příjemný vzhled a zároveň dosáhnout požadovaných výsledků.

Pro návrh jsem použil dva akustické materiály ve formě rezonátoru. Prvním jsou perforované akustické desky pro obklady stěn od firmy Rigips - *Rigiton RL 10/23* s odsazením 200mm.

### Činitel zvukové pohltivosti $\alpha_p$



### Umístění a velikost perforací [mm]



Výška svěšení [mm]	Minerální izolace [mm]	Činitel zvukové pohltivosti $\alpha_p$ /Hz							$\alpha_w$	NRC	Třída zvukové pohltivosti <sup>1)</sup>
		125	250	500	1000	2000	4000				
50	—	0,10	0,25	0,65	0,90	0,55	0,25	0,45 (M)	0,60		C
200	—	0,35	0,70	0,85	0,60	0,50	0,35	0,50 (LM)	0,65		C
200	50*	0,65	0,95	0,90	0,80	0,65	0,45	0,65 (LM)	0,85		B

<sup>1)</sup> dle ČSN EN ISO 11 654; \* například Isover Akustic SSP2

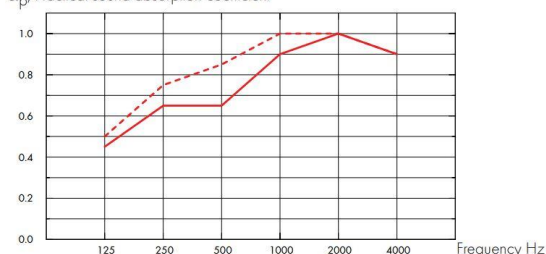
Obr. 46 Perforované akustické desky pro obklady stěn Rigiton RL 10/23 [16]

Druhým akustickým prvkem použitým jako obklad stěn jsou desky od firmy Ecophon - *Hygiene LaboratecAir™ A C1* s odsazením 20mm. Aby byly desky ve stejné vzdálenosti, je nutné za těmito panely vytvořit zadní stěnu s odsazením 180mm.

### Sound Absorption:

Test results according to EN ISO 354. Classification according to EN ISO 11 654.

$\alpha_p$  Practical sound absorption coefficient



— Hygiene Labotec Air A 20 mm, 200 mm o.d.s.  
 --- Hygiene Labotec Air A 40 mm, 200 mm o.d.s.  
 o.d.s = overall depth of system

THK mm	o.d.s. mm	$\alpha_p$ Practical sound absorption coefficient							$\alpha_w$	Sound absorption class
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz			
20	200	0.45	0.65	0.65	0.90	1.00	0.90	0.75		C
40	200	0.50	0.75	0.85	1.00	1.00	0.90	0.95		A

Obr. 47 Zvuk pohlcující desky Ecophon [17]

S předchozí tabulky (základního výpočtu) jsem si převzal celkovou ekvivalentní pohltivou plochu  $A_{\text{celk}}$ , protože z ní vychází výpočet pro teoretické zjištění potřebné plochy pro akustické desky.

Optimální ekvivalentní plochu  $A_{\text{opt}}$  jsem spočítal za pomoci Millingtonova vztahu (2.10) na základě objemu kostela a optimální dobu dozvuku  $T_{\text{opt}}$  jako:

$$A_{\text{opt}} = 0,164 \cdot \frac{V}{T_{\text{opt}}} + 4mV \quad (\text{m}^2) \quad (4.6)$$

Pro předběžné zjištění plochy  $S \text{ (m}^2\text{)}$  jsem podělil nově vypočítanou ekvivalentní plochu ( $A_{\text{opt}} - A_{\text{celk}}$ ) činitelem útlumu pro daný akustický materiál Rigiton.

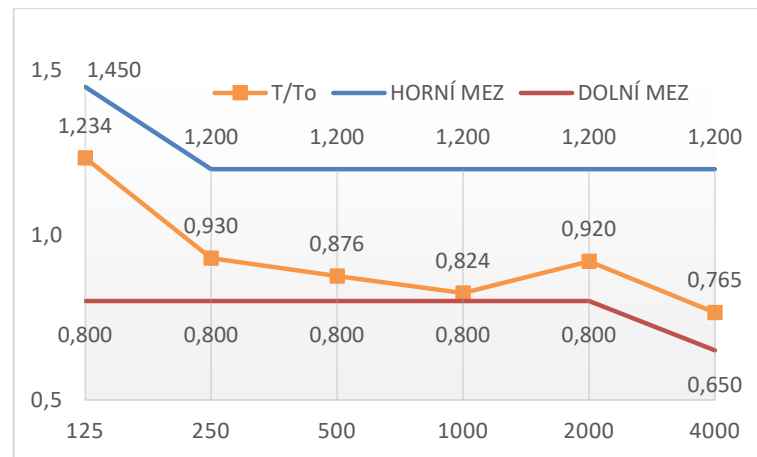
Podle frekvence 250 Hz jsem navrhl plochu desek Rigiton  $600 \text{ m}^2$ , ale jak se ukázalo, křivka doby dozvuku nebyla utlumena v dostatečné míře na všech frekvencích, a tak jsem musel pomocí desek Laboratec provést další akustické opatření a utlumení na zbývajících frekvencích.

Plochu desek Rigiton jsem snížil na  $400 \text{ m}^2$  a do výpočtu vložil nové proměnné s vlastnostmi nových desek rezonátoru 2, kterému jsem určil plochu  $250 \text{ m}^2$ .

Celý výpočet je vidět v následující tabulce a jak je patrné z příloženého grafu na základě zjištěných hodnot, doba dozvuku byla ideálně utlumena tak, aby vyhovovala předepsaným normovým požadavkům dle [5].

Tab. 9: Návrh akustických opatření pro ruční výpočet Doby dozvuku [autor]

	KMITOČET [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{\text{rezonátor1}}$	0,65	0,95	0,90	0,80	0,45	0,65
$A_{\text{celk}}$	292,65	331,40	382,36	444,77	478,69	608,74
$A_o$	863,86	861,08	852,74	844,40	816,60	702,62
$A_o - A_{\text{celk}}$	571,20	529,68	470,38	399,63	337,91	93,88
Plocha S	878,77	557,56	522,64	499,54	750,91	144,43
A1	260,00	380,00	360,00	320,00	180,00	260,00
$\alpha_{\text{rezonátor2}}$	0,50	0,75	0,85	1,00	1,00	0,90
A2	125,00	187,50	212,50	250,00	250,00	225,00
$A_{\text{celk 2}}$	677,65	898,90	954,86	1014,77	908,69	1093,74
T	1,623	1,224	1,152	1,084	1,211	1,006
$T_o$	1,315	1,315	1,315	1,315	1,315	1,315
$T/T_o$	1,234	0,930	0,876	0,824	0,920	0,765



Graf 3 Upravená doba dozvuku pomocí vhodného akustického opatření ve výpočtu MS Excel tak, aby nezasahovala mimo stanovené meze pro varhanní hudbu a řeč [autor]

Z výše uvedeného grafu 3 je patrné, že kostel s navrhovanými úpravami pomocí ručního výpočtu splňuje normové požadavky na dobu dozvuku  $T$  (s).

## 4.4. Simulace v Odeon Room Acoustics Program

### 4.4.1. Rozmístění zdrojů v kostele dle ČNS EN ISO 3382-2

Vysílací body jsou umístěny na místa, odkud se předpokládá, že budou hlavními zdroji zvuku. Na jednom z kůrů jsou umístěny varhany, které budou dominantou celého kostela. Dalšími body jsou prostory presbytáře a druhý kůr, kde se mohou nacházet muzikanti a zpěváci.

	Orientační	Inženýrské <sup>a</sup>	Přesné
Kombinace zdroj – mikrofón	2	6	12
Místa zdroje <sup>b</sup>	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Místa mikrofónu <sup>c</sup>	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Počet poklesů v každém místě (metoda přerušného šumu)	1	2	3
<sup>a</sup> Když se výsledek použije pro korekční člen k jiným měřením technické úrovně, požadují se pouze jedno místo zdroje a tři místa mikrofónu. <sup>b</sup> U metody přerušného šumu lze použít více nekoherentních zdrojů současně. <sup>c</sup> U metody přerušného šumu a když se výsledek použije pro korekční člen, může být využit rotující mikrofónní stojan místo několika mikrofónních míst.			

Obr. 48 Minimální počty míst a měření [15]

Výpočtový model jsem provedl dle inženýrské metody.

V kostele budou dle *obr. 48* vytvořeny celkem 3 pozice všesměrového zdroje označeny jako Z1, Z2 a Z3. Zdroj Z1 je umístěn v presbytáři ve výšce 2,25m, druhý Z2 je umístěn na zadním kůru, kde budou varhany, ve výšce 9m a třetí je na bočním kůru, kde budou zpěváci, ve výšce 7m. Všechny tři zdroje jsou umístěny vzhledem k absolutní nule, ne k přilehlé podlaze. Při výpočtu je aktivní vždy jen jeden zdroj, ale zároveň všechny mikrofony. (Podrobněji v kapitole 2.9.8).

V půdorysném prostoru kostela je taky vytvořeno 6 pozic mikrofونů pro příjem zvukového signálu, k měření doby dozvuku a dalších parametrů. Jednotlivé mikrofony jsou označeny M1-M6 a jsou umístěny ve výšce 2m, aby nebyly kryté osobami sedícími v lavicích.

Přesné umístění zdrojů a mikrofونů je patrné z *obr. 49*. Všechny kóty jsou provedeny v kolmém směru na přilehlou obvodovou stěnu.

Všechny pozice splňují normativní požadavky pro jejich umístění. Jak je uvedeno v ČNS EN ISO 3382-2: „...místa zdroje mohou být zvolena jako obvyklá místa v souladu s využíváním prostoru. Dále, mikrofonní místa by měla být od sebe pokud možno vzdálena nejméně na polovinu vlnové délky, tj. na minimální vzdálenost kolem 2m pro obvyklý kmitočtový rozsah. Vzdálenost kteréhokoliv místa mikrofonu k nejbližšímu odrážejícímu povrchu, včetně podlahy, by měla být alespoň  $\frac{1}{4}$  vlnové délky, tj. kolem 1m. Je nutné vyloučit symetrická místa, proto jsou jednotlivé mikrofony rozmístěny v „nerovnoměrném“ uspořádání. Žádný z mikrofونů nesmí být umístěn příliš blízko jakéhokoliv zdroje, aby se zabránilo silnému vlivu přímého zvuku. Minimální vzdálenost  $d_{min}$  v metrech se dá spočítat dle:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (m) \quad (4.6)$$

kde  $V$  je objem kostela v  $m^3$ ,

$c$  rychlost šíření zvuku v prostředí v  $m.s^{-1}$ ,

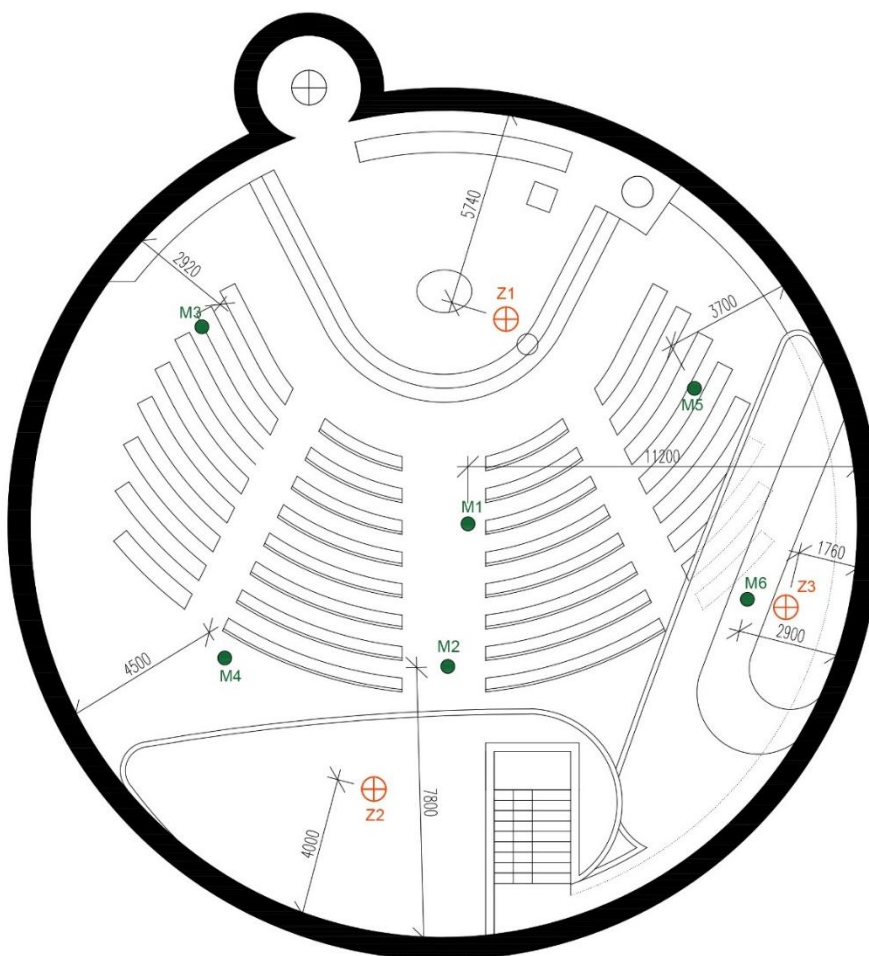
$T$  odhad očekávané doby dozvuku v sekundách"

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{6950}{340 \cdot 4}} = 4,52m \quad \rightarrow \quad \text{splněno}$$

Žádný z mikrofونů není umístěn příliš blízko zdroje zvuku. Možná dle přiloženého *obr. 49* by se mohlo zdát, že mikrofon M5 nebo M6 tento požadavek



nesplňují vzhledem ke zdroji Z3, ale je nutné si ovšem uvědomit, že zdroj Z3 je ve výšce 7m a mikrofon M5 a M6 je umístěn ve výšce 2m, proto nelze uvažovat pouze půdorysnou vzdálenost.

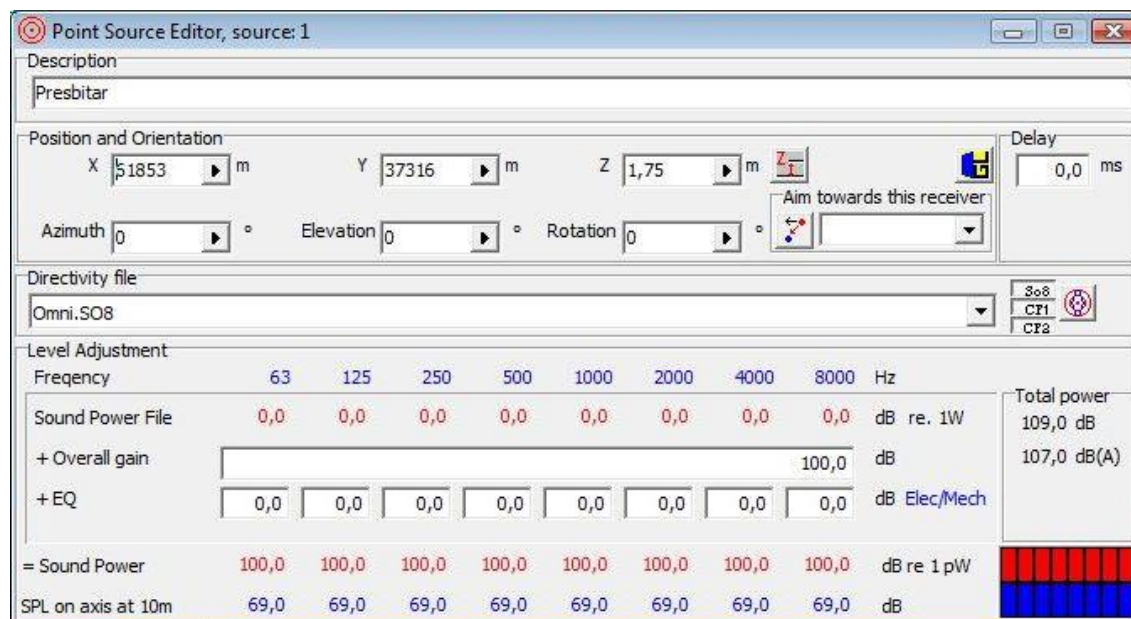


Obr. 49 Rozmístění zdrojů a mikrofonů v prostoru kostela [autor]

### Zadání a nastavení zdrojů:

Zdroje jsou zadány jako všesměrové zdroje (Directivity file: Omni.SO8) s celkovým výkonem (*Overall gain*) 100 dB, protože je nutné pro daný prostor kostela vytvořit dostatečně silný zvukový signál, který celý prostor vybudí a nestane se, že na nějaké frekvenci by se nezaznamenaly žádné hodnoty. Zdroj lze však zadat i různými hodnotami v rámci posuzovaného spektra (EQ), například pro charakterizování lidské řeči. Souřadnice (*Position and Orientation*) se zadávají v souladu se zvoleným počátkem souřadné soustavy při vytváření modelu.

Příklad zadání zdroje zvuku je patrný z obr. 50.



Obr. 50 Zadání zdroje zvuku [autor a 12]

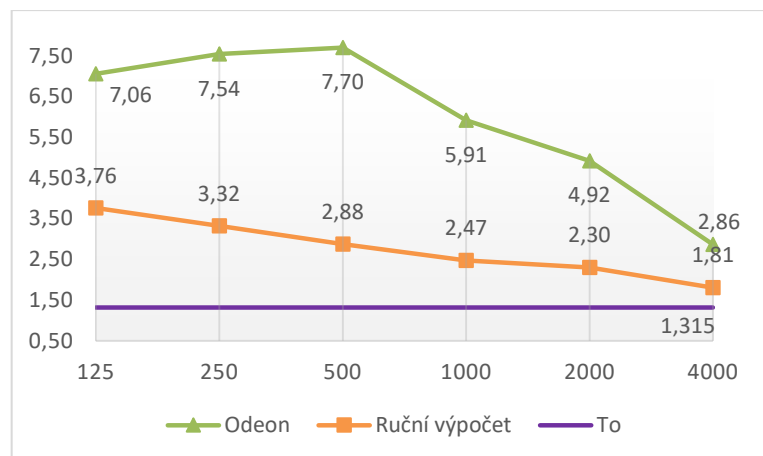
#### 4.4.2. Zhodnocení stávajícího stavu

- Srovnání doby dozvuku vypočítané a simulované

Abych se přesvědčil, jaký bude rozdíl mezi ručně zpracovaným výpočtem a simulací v programu Odeon při výpočtu bez úprav, porovnal jsem své vypočítané hodnoty s hodnotami, kterých jsem dosáhl simulací na modelu v programu Odeon.

Tab. 10: Porovnání vypočítané a naměřené doby dozvuku  $T$  (s) v programu Odeon Room Acoustics [autor]

Doba dozvuku T (s)							
	Zdroj	Frekvence (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Ruční výpočet		3,76	3,32	2,88	2,47	2,30	1,81
Odeon	Z1	7,06	7,55	7,66	5,88	4,87	2,84
	Z2	7,08	7,58	7,76	5,97	4,97	2,88
	Z3	7,03	7,49	7,69	5,89	4,91	2,87
	Průměr	7,06	7,54	7,70	5,91	4,92	2,86
Rozdíl		3,30	4,22	4,83	3,44	2,62	1,06



*Graf 4 Porovnání vypočítané a naměřené doby dozvuku  $T$  (s) v programu Odeon Room Acoustics v závislosti na optimální době dozvuku  $T_0$  (s) [autor]*

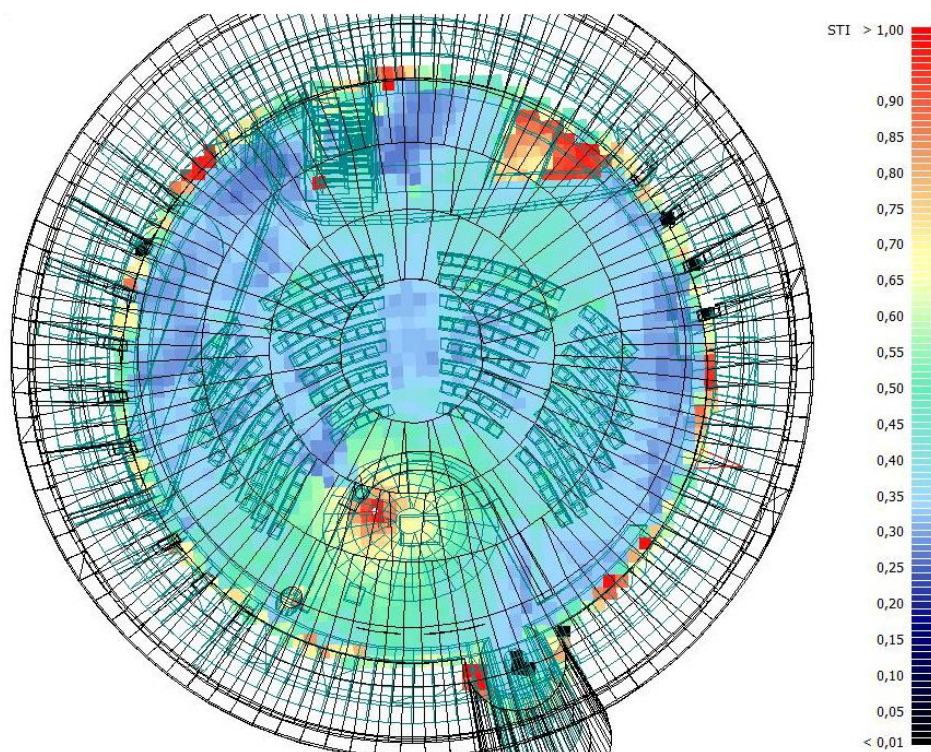
Jak je patrné z *tabulky 10* a *grafu 4*, mezi ručním výpočtem a naměřenou dobou dozvuku je patrný rozdíl. Tento rozdíl může být dán mnoha vlivy, jako například rozdílnost mezi teoretickým výpočtem a modelem, který je ve svém výsledném stavu zjednodušen, protože nebylo možné v jeho počátcích s ním pracovat. Také materiálová charakteristika je v modelu přesněji definována a je zde zohledněno 3D uspořádání interiéru, a tak se mohou např. jednotlivé výpočtové plochy lišit.

Samozřejmě na to mohou mít vliv menší zkušenost s programem Odeon. S většími zkušenostmi by se dalo k modelu přistupovat u některých prvků a geometrie a nastavení výpočtu odlišně, a tak by se dalo dosáhnout ještě lepších výsledků. I když nelze přesně určit, který z grafů odpovídá větší skutečnosti.

- **Vyhodnocení simulace srozumitelnosti**

Aby bylo zřejmé, k jakému cíli jsem tímto projektem došel a čeho jsem dosáhl, provedl jsem simulaci srozumitelnosti původního stavu kostela pomocí síťové odezvy.

Výpočet jsem provedl pomocí zdroje Z1 umístěného v presbytáři kostela, tedy na místě, odkud bude promlouvat kněz k lidem. Zdroj byl definován stejně, jako je tomu u navrženého stavu, tedy hodnota akustického tlaku je 100dB, pro dostatečné nabuzení tohoto velkého prostoru kostela, výška zdroje 2,25m k absolutní nule.



Obr. 51 Simulace srozumitelnosti v kostele – model původního stavu [autor a 12]

Z výše přiloženého obrázku 49 je zřejmé, že hodnoty indexu srozumitelnosti  $I$  (-) [STI – Speech Transmission Index] se pohybují v rozmezí cca od 0,5 do 0,75 pro vzdálenost cca 3m od místa zdroje. Jen ve zpodělnici, v místnosti pod kůrem, je vidět, že je kvalitní poslech zvuku, avšak je to místo, kde není třeba provádět návrh. V ostatních prostorách kostela hodnoty indexu srozumitelnosti klesají do rozmezí cca 0,25 - 0,4.

Při pohledu na vyhodnocené model je třeba brát v potaz komplikovaný (nepravidelný) tvar, který není čtyřúhelníkový a proto jsou po obvodu kostela různé hodnoty STI, které jsou spíše chybové než reálné.

Hodnoty indexu srozumitelnosti jsou dány v následující tabulce.

Tab. 11: Hodnoty indexu srozumitelnosti a jejich hodnocení [11]

Index srozumitelnosti $I$ (-)	Srozumitelnost je
0,00	Nulová
0,00 až 0,30	Velmi špatná
0,30 až 0,45	Unavující
0,45 až 0,60	Ucházející
0,60 až 0,75	Dobrá
0,75 až 1,00	Výborná

Při pohledu na *tabulku 11* je jasné, že hodnoty STI spadají převážně do kategorie „velmi špatná a unavující“, pouze část prostorů kolem zdroje Z1 spadá do kategorie „ucházející a dobrá“, a tak je zřejmé, že tento stav není optimální. Je tedy třeba vhodnými úpravami prostor kostela zlepšit a tak docílit mnohem lepších výsledků.

#### 4.4.3. Zhodnocení navrženého stavu

- **Porovnání doby dozvuku vypočítané a simulované**

Materiálů použité jako obklady stěn pro snížení doby dozvuku  $T$  (s) jsou *Rigiton RL 10/23* (Rigips) a *Hygiene LaboratecAir<sup>TM</sup> A C1* (Ecophon). Oba dva materiály byly rozmístěny na stěny interiéru kostela tak, aby účinně upravily dobu dozvuku šířící se tímto prostorem. Podrobněji v kapitole 4.3.

Tab. 12: Porovnání ploch materiálů v ručním výpočtu a v Odeonu [autor]

	Materiál	Plocha (m <sup>2</sup> )
Ruční výpočet	<i>Rigiton RL 10/23</i> (Rigips)	400
	<i>Hygiene LaboratecAir<sup>TM</sup> A C1</i> (Ecophon)	250
Odeon	<i>Rigiton RL 10/23</i> (Rigips)	500
	<i>Hygiene LaboratecAir<sup>TM</sup> A C1</i> (Ecophon)	400

Jak ukazuje *tabulka 12*, v jednotlivých výpočtech je použito různého množství materiálu pro akustické opatření. Vliv na to může mít komplexnost ručního výpočtu, forma, kterou byl proveden, ale stejně tak na tom bude mít velký vliv model v programu Odeon a samotný výpočet v tomto 3D prostoru.

Tab. 13: Naměřená doba dozvuku  $T$  (s) v programu Odeon Room Acoustics [autor]

Doba dozvuku $T$ (s) - návrh							
	Zdroj	Frekvence (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Zdroje	Z1	1,51	1,31	1,29	1,20	1,33	1,10
	Z2	1,51	1,32	1,39	1,35	1,38	1,10
	Z3	1,60	1,48	1,43	1,12	1,29	1,12
	Průměr	1,54	1,37	1,37	1,22	1,33	1,11

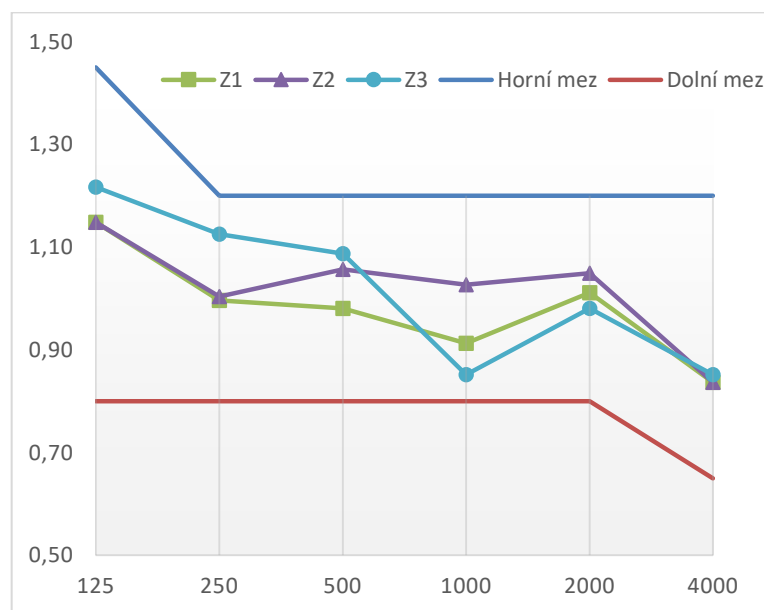
- **Porovnání s platnou legislativou**

Kmitočtový průběh doby dozvuku  $T$  (s) se prověřuje pomocí optimální doby dozvuku  $T_0$  (s). Kmitočtová závislost přípustného rozmezí je dána poměrem obou hodnot  $T/T_0$ .

Celá problematika je vyřešena a podrobně zpracována v kapitole 4.3.

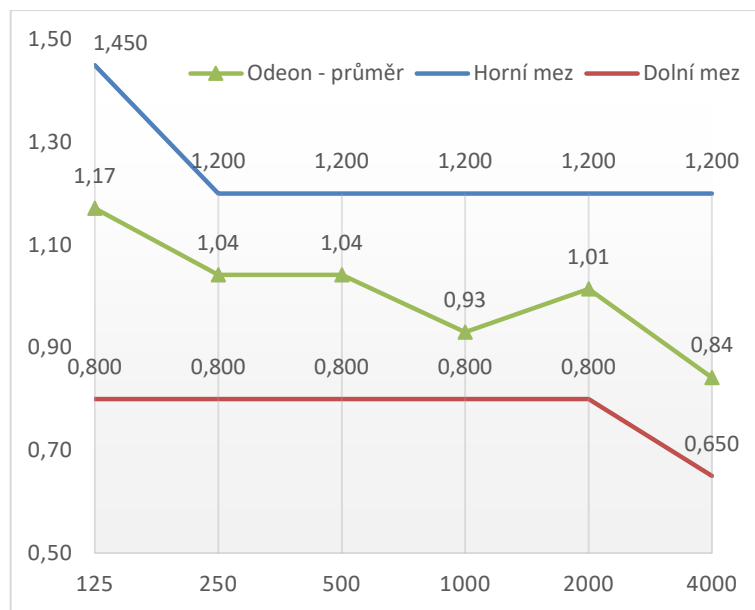
Tab. 14: Poměr doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_0$  (s) na stanovených mezích [autor]

f (Hz)	T <sub>0</sub> (s)	Z1		Z2		Z3		Meze	
		T (s)	T/T <sub>0</sub>	T (s)	T/T <sub>0</sub>	T (s)	T/T <sub>0</sub>	Horní	Dolní
125	1,315	1,51	1,15	1,51	1,15	1,60	1,22	1,45	0,80
250	1,315	1,31	1,00	1,32	1,00	1,48	1,13	1,20	0,80
500	1,315	1,29	0,98	1,39	1,06	1,43	1,09	1,20	0,80
1000	1,315	1,20	0,91	1,35	1,03	1,12	0,85	1,20	0,80
2000	1,315	1,33	1,01	1,38	1,05	1,29	0,98	1,20	0,80
4000	1,315	1,10	0,84	1,10	0,84	1,12	0,85	1,20	0,65



Graf 5 Poměr doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_0$  (s) na stanovených mezích [autor]



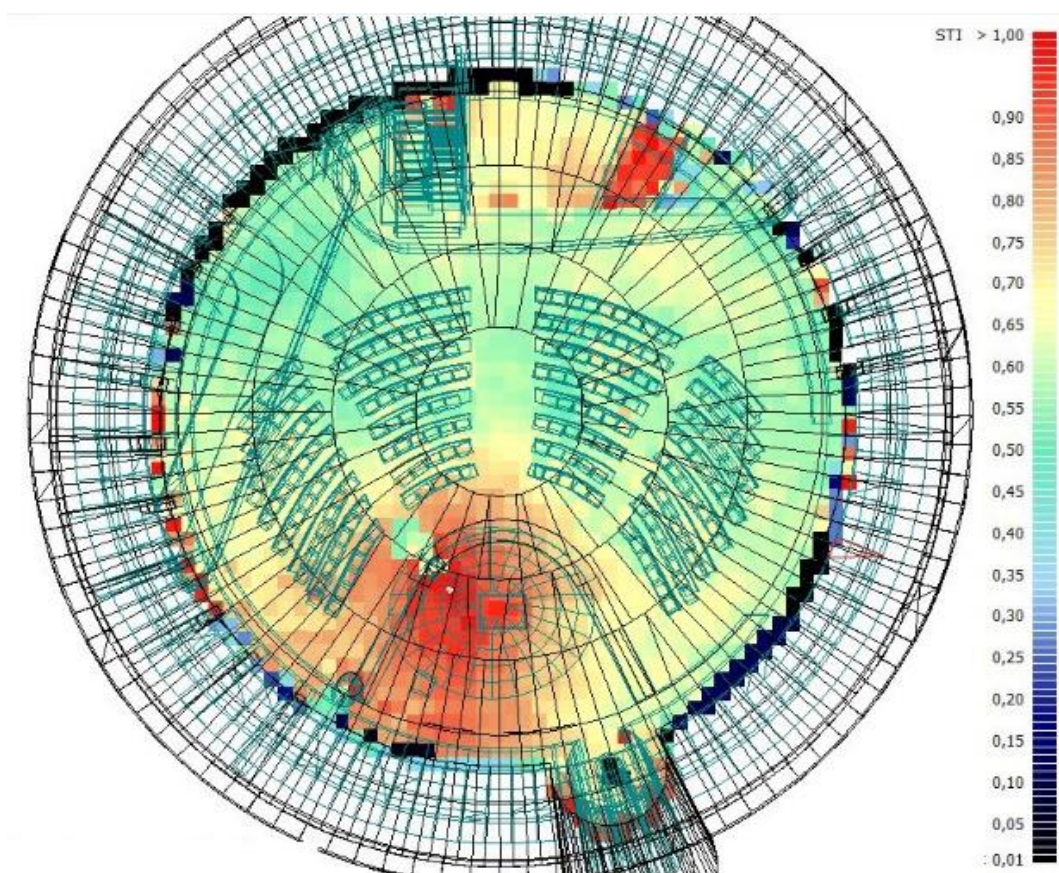


Graf 6 Průměrná hodnota poměru doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_o$  (s) na stanovených mezích [autor]

Z výše uvedených grafů 5 a 6 je patrné, že kostel s navrhovanými úpravami splňuje normové požadavky na dobu dozvuku  $T$  (s).

- Vyhodnocení simulace srozumitelnosti**

Opět pomocí zdroje Z1 jsem tentokrát v navrženém stavu zjistil míru srozumitelnosti, abych mohl následně provést porovnání, čeho se mi podařilo dosáhnout úpravou interiéru kostela akustickými materiály.



Obr. 52 Simulace srozumitelnosti v kostele – model navrženého stavu [autor a 12]

Podle očekávání jsou na výše přiloženém obrázku hodnoty indexu srozumitelnosti  $I$  (-) [STI – Speech Transmission Index] v mnohem lepším rozmezí, než tomu bylo u původního stavu. Pohybují se v rozmezí cca od 0,7 do 1,00 pro vzdálenost 7-10m od místa zdroje. Srozumitelnost na hodnotě 0,7 je vidět ještě v dalších prostorách kostela, převážně v zadní části pod kůrem. Ve zvědnici a tentokrát i pod kůrem (v předsíni), je opět vidět kvalitní poslech zvuku, avšak jsou to místa, kde se během mše nebude nikdo nacházet. V ostatních prostorách kostela hodnoty indexu srozumitelnosti klesají do rozmezí cca 0,5 - 0,6.

Tab. 15: Hodnoty indexu srozumitelnosti a jejich hodnocení [11]

Index srozumitelnosti $I$ (-)	Srozumitelnost je
0,00	Nulová
0,00 až 0,30	Velmi špatná
0,30 až 0,45	Unavující
0,45 až 0,60	Ucházející
0,60 až 0,75	Dobrá
0,75 až 1,00	Výborná



Při pohledu na *tabulku 15* je jasné, že hodnoty STI spadají do kategorie „výborná“ v blízkém okruhu od zdroje Z1, a zbývající části prostoru kostela spadají do kategorie „dobrá“. Je tedy patrné, že akustická úprava kostela dosáhla velmi kvalitních výsledků.

## 4.5. Hluk+

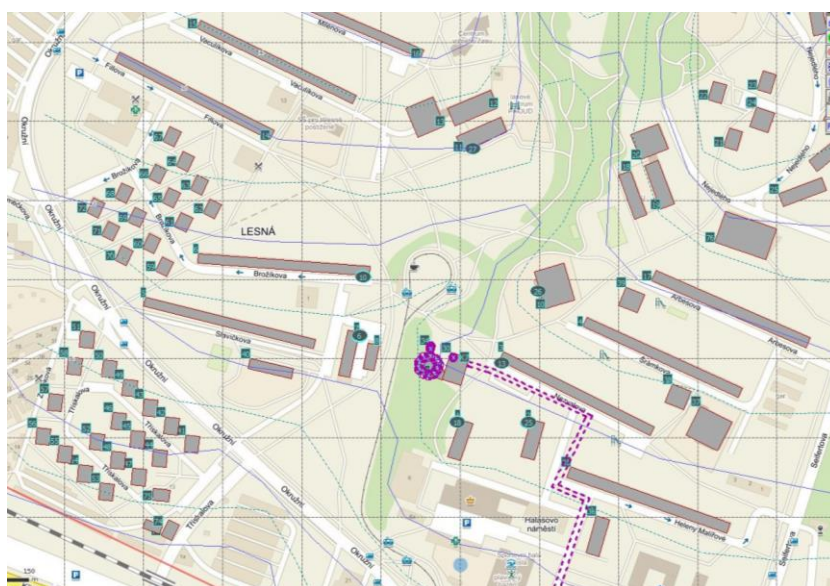
Tento program slouží pro vytvoření hlukových studií a posouzení šíření zvukového signálu do okolí. Jde o grafický software, který zadanou situaci dokáže nejen spočítat, ale i zobrazit v jednotlivých pásmech sílu akustického tlaku.

Nebudu se zde zabývat, jakým způsobem se zadávají jednotlivé objekty, doprava atd. a jak program pracuje, protože k tomuto účelu slouží velmi přehledný manuál.

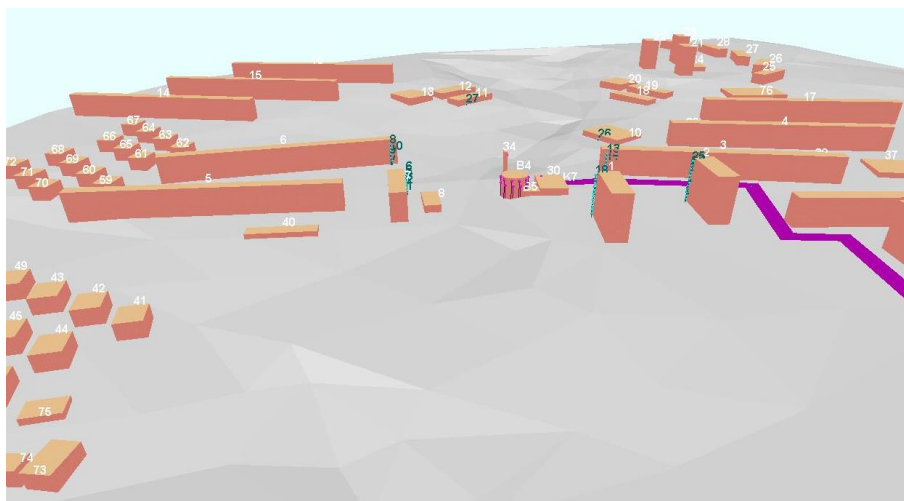
#### 4.5.1. Situační model

Prvotním předpokladem pro práci tedy bylo nastudování tohoto softwaru pomocí manuálu, ale velkou část k jeho úspěšnému zvládnutí však měla i práce na semestrálním úkolu v letním semestru v předmětu *Prostorová akustika*.

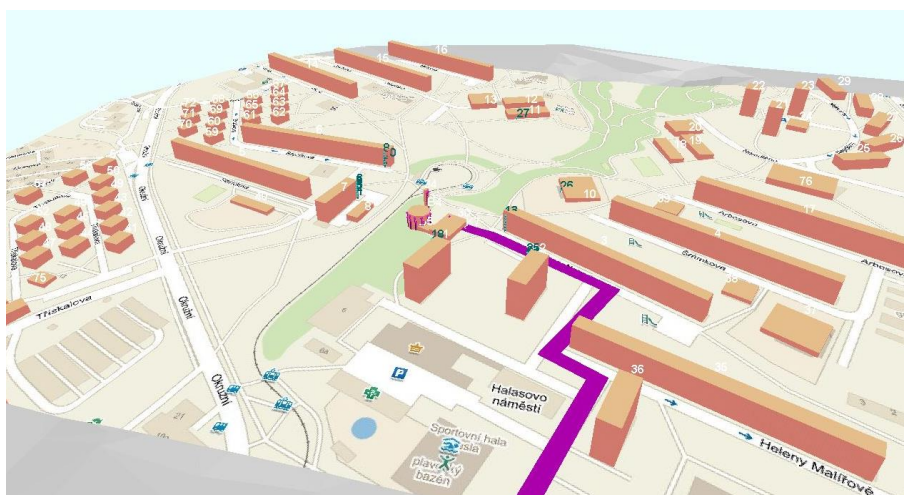
Abych mohl provést výpočet samotný, musel jsem nejprve vytvořit 3D model bližšího okolí budoucího kostela v části Brno-Lesná jak je vidět na následujících obrázcích:



*Obr. 53 Půdorysné zobrazení zástavby blízkého okolí kostela v části Brno-Lesná [autor a Hluk+]*



*Obr. 54 Model zástavby s vymodelovaným terénem [autor a Hluk+]*



*Obr. 55 Model zástavby na mapovém podkladu [autor a Hluk+]*

Na začátku své práce jsem potřeboval mapový podklad, který jsem pomocí importu vložil do programu, kde jsem jej následně pomocí měřítka upravil tak, aby jeho rozměry odpovídali skutečnému prostředí. Po nachystání mapového podkladu jsem mohl začít modelovat terén, který se vytváří pomocí ručního vkládání přes *Menu zadávání >> Vrstevnici*. Po této volbě se otevře dialogové okno, kde stačí zadat pouze určenou nadmořskou výšku. V mém případě je místo kostela zvoleno jako výchozí nulová výška a od této vrstevnice jsem vkládal další buď s kladnými nebo zápornými hodnotami (+5, +10, nebo -5, -10,...). Druhou volbu, která je potřeba zadat, zda má být vrstevnice uzavřená nebo otevřená. Protože jsem dělal výřez mapy, zatrhl jsem volbu otevřených vrstevnic, které jsem tvořil jako otevřené křivky. Takový postup je vhodný pro menší lokální situace.

Terén lze taky vytvořit automaticky a to je užitečné především v okamžiku, kdy vyvážíme větší hornatou krajinu. Toho můžeme dosáhnout pomocí importu výškopisu. Více se o tom lze dozvědět z manuálu pro Hluk+.

Ve chvíli, kdy jsem měl celý model připravený, mohl jsem začít nastavovat další parametry, jako je např. doprava z příjíždějících a odjíždějících aut na bohoslužbu, která je zaznamenána pomocí fialové křivky.

#### 4.5.2. Výpočet náhradních bodových zdrojů

Dalším úkolem bylo nastavení zdrojů zvuku, kterými jsou zvony ve zvonici, a pak taky náhradní bodové zdroje na fasádě kostela, které nahrazují zvuk produkovaný varhanami uvnitř kostela.

Výpočet jsem provedl pomocí literatury [1], kde jsem se dozvěděl, jak vypočítat dvojité příčky z hmotných stěn, jelikož stěny kostela jsou provedeny z dvou vrstev betonu, mezi nimiž se nachází tepelná izolace.

Jak se zde dále popisuje, jelikož výplň a vzduchová mezera příliš neovlivňují výslednou neprůzvučnost a dosahují malých hodnot, volí se přírůstek indexu  $\Delta R_w$  (0,5–1,5dB).

- **Index vzduchové neprůzvučnosti**

$$R_w = R_w(m'_1 + m'_2) + \Delta R_w \quad (\text{dB}) \quad (4.7)$$

kde  $R_w(m'_1 + m'_2)$  je index vzduchové neprůzvučnosti v dB jednoduché plné

příčky o celkové plošné hmotnosti obou dílčích stěn,

$\Delta R_w$  přírůstek indexu vzduchové neprůzvučnosti v dB v závislosti na tloušťce vzduchové mezery [1]

#### **Materiálová charakteristika betonu:**

Objemová hmotnost ŽB:  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$

Tloušťka stěny:  $d = 0,65 \text{ m}$  (izolační materiál nebudu posuzovat, protože celou stěnu budu uvažovat jako homogenní)

Plošná hmotnost:  $m'_1 = 2400 \cdot 0,65 = 1560 \text{ kg/m}^2$

$\Delta R_w$  1 dB

$$R_w(m'_1 + m'_2) = 37,5 \cdot \log\left(\frac{m'_1}{m'_0}\right) - 42 \quad [\text{ČSN EN 12354-1}]$$

$$(m'_0 = 1)$$

$$R_w(m'_1 + m'_2) = 37,5 \cdot \log(1560/1) - 42 = 77,7 \text{ dB}$$

$$\mathbf{R_w = R_w(m'_1 + m'_2) + \Delta R_w = 77,7 + 1 = 78,7 \text{ dB}}$$

#### Bezrámová okna:

$$\mathbf{R_w = 38 \text{ dB (dle výrobce)}}$$

- Hladina akustického výkonu náhradního zdroje pro fasádu**

$$L_w = L_{p,in} + C_d - R_w + 10\log(S/S_o) \quad (\text{dB}) \quad (4.8)$$

- kde  $L_{p,in}$  je hladina akustického tlaku ve vzd. 1-2 m od vnitřní strany segmentu v dB (pro varhany  $L_{p,in} = 90 \text{ dB}$ , dle ing. Berkové)
- $C_d$  difuznost vnitřního zvukového pole u segmentu v dB (pro daný prostor kostela  $C_d = -3 \text{ dB}$ )
- $S$  plocha segmentu v  $\text{m}^2$
- $S_o$  referenční plocha ( $S_o = 1 \text{ m}^2$ ) [ČSN EN 12354-4]

Výpočet ploch segmentů:

Obvod kostela jsem rozdělil na 10 segmentů, kde šířka jednoho segmentu je 7,4 m a výška je dána daným umístěním. Nad kůry je výška segmentů 6,7 m a ve zbytku kostela je 12 m.

$$\text{Nad kůry: } S = 7,4 \times 6,4 = 49,6 \text{ m}^2$$

$$\text{Ostatní: } S = 7,4 \times 12 = 88,8 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{L_{w,kůry} = 90 + (-3) - 78,7 + 10\log(49,6/1) = 25 \text{ dB}}$$

$$\mathbf{L_{w,ostatní} = 90 + (-3) - 78,7 + 10\log(88,8/1) = 28 \text{ dB}}$$

- Hladina akustického výkonu náhradního zdroje pro okna**

$$\text{Plocha segmentů oken } S = 7,4 \times 2,5 = 18,5 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{L_{w,okna} = 90 + (-3) - 38 + 10\log(18,5/1) = 32 \text{ dB}}$$

Protože se v kostele uvažuje s přirozeným větráním, budou do výpočtu zahrnuty dva segmenty jako plně otevřené a náhradní bodové zdroje budou mít tedy hladinu akustického tlaku rovnou 90 dB.

Po získání těchto výsledků jsem se mohl opět vrátit do programu Hluk+ a tyto náhradní zdroje zadat do modelu.

Každý z těchto zdrojů zastupuje daný segment ať už fasády, nebo oken a jejich umístění se provádí ve 2/3 výšky a v polovině šířky daného segmentu. Rozmístění zdrojů je patrné z přílohy B.2 - *Hluk+*, kde jsou zaznamenány jako průmyslové zdroje.

#### • Hladina akustického tlaku ostatních zdrojů

Pro zvony ve věži je hladina akustického tlaku  $L_A = 87$  dB, kdy jsou souběžně v provozu 3 zvony, dle ing. Bekové.

Pro dopravu jsem navrhl příjezd a odjezd aut dle možnosti podzemní garáže, kde je parkování pro 22 aut a to pouze v době bohoslužby, tedy od 18 do 19 h.

Protože neznám návrh vzduchotechniky pro odvětrání garáží, navrhl jsem zde obecnou hodnotu hladiny akustického tlaku na hranici hygienického limitu  $L_A = 50$  dB.

#### 4.5.3. Porovnání s legislativou

Abych posoudil, jaký dopad bude mít nově vystavěný kostel na okolní zástavbu, vytvořil jsem přijímací místa ve svislém směru na fasádách nejbližších objektů, na které by měl mít kostel největší vliv. Mikrofonní místa jsou umístěna 2 m před fasádou v místě oken jednotlivých bytů. Posuzované objekty jsou označena čísla 1, 2, 3, 6, 7, 10, 11 viz protokol o měření nebo na *obr. 53-55*.

*Tab. 16 Hladina akustického tlaku pro akustickou situaci [autor a Hluk+]*

Hluk ve výpočtových bodech		Akustický situace $L_{Aeq,T}$ (dB)	Hygienický limit
Označení	Výška (m)		$L_{Aeq,T}$ (dB) = 45 dB (den)
1	4	41,9	dodržen
2	7	42,3	dodržen
2	10	45,4	nedodržen
3	13	45,5	nedodržen
4	16	45,5	nedodržen

5	19	45,5	nedodržen
6	22	45,6	nedodržen
7	4	40,8	dodržen
8	7,5	42,4	dodržen
8	18	42,6	dodržen
8	21,5	42,6	dodržen
9	11	42,5	dodržen
10	14,5	42,5	dodržen
11	4	47,2	nedodržen
11	14,5	48,1	nedodržen
12	7,5	47,7	nedodržen
12	11	48,0	nedodržen
12	18	48,1	nedodržen
13	21,5	48,1	nedodržen
14	4	40,3	dodržen
14	13	42,6	dodržen
15	7	42,5	dodržen
15	10	42,6	dodržen
15	16	42,7	dodržen
15	19	42,8	dodržen
16	21	42,9	dodržen
16	24	42,9	dodržen
17	27	42,9	dodržen
17	30	42,9	dodržen
18	33	42,8	dodržen
18	37	42,7	dodržen
19	3	39,5	dodržen
19	9	41,6	dodržen
19	12	42,1	dodržen
19	15	42,5	dodržen
19	21	42,7	dodržen
19	24	42,7	dodržen
20	6	41,0	dodržen
21	18	42,5	dodržen
22	27	42,7	dodržen
23	30	42,1	dodržen
24	33	42,1	dodržen
25	37	42,0	dodržen
26	2,5	38,6	dodržen
27	2,5	36,4	dodržen

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že ne pro všechna pásma je dodržen hygienický limit pro chráněné venkovní prostory stavby dle *tab. 17*.

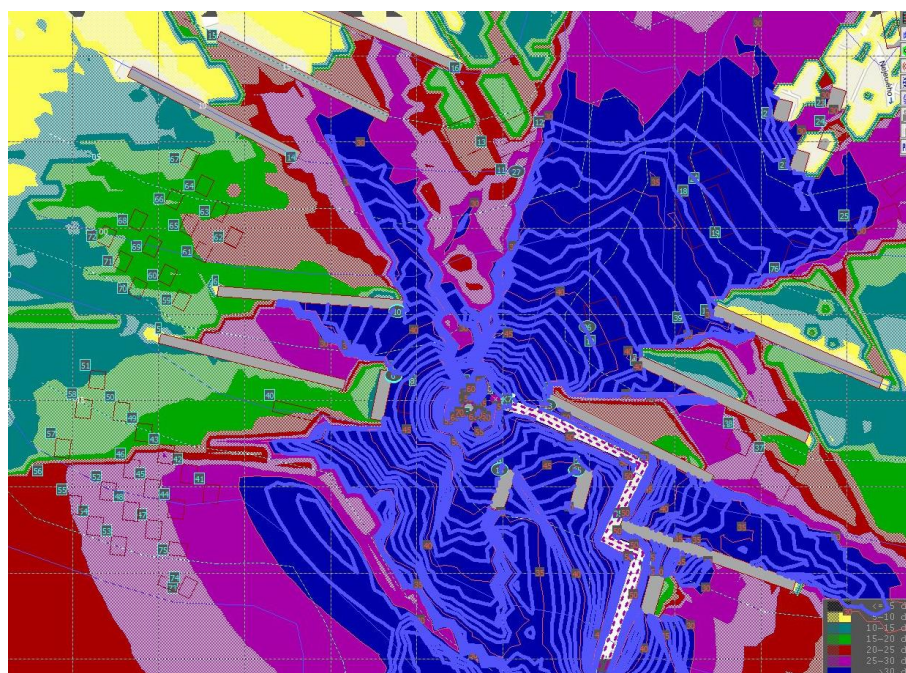


Protože se ale jedná o krátkodobou hudební produkci, jistě to nebude příliš na obtíž pro místní obyvatele.

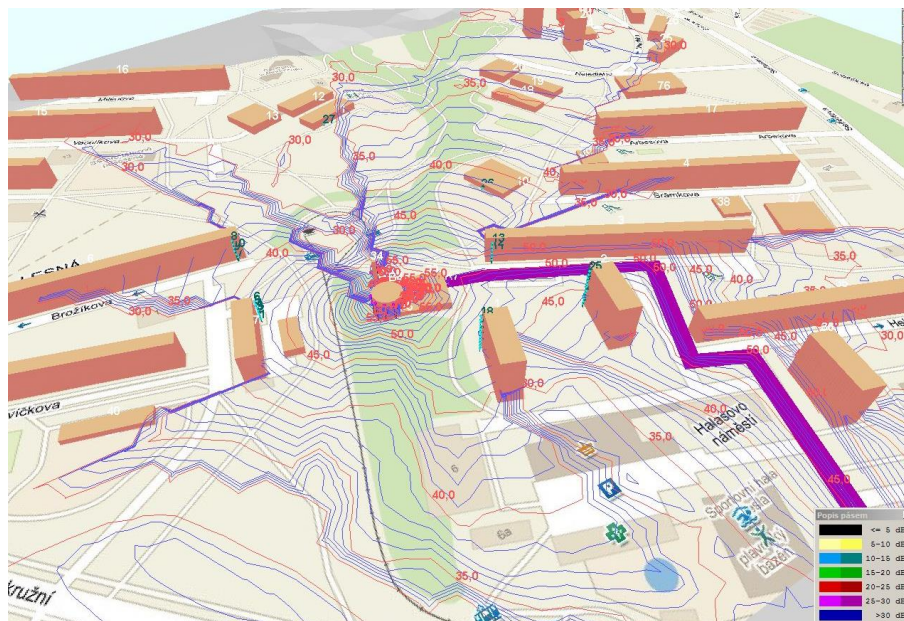
Tab. 17 Stanovení hygienických limitů v ekvivalentní hladině akustického tlaku  $A L_{Aeq,T}$  (dB) v chráněném venkovním prostoru stavby

Druh hluku	Den 06:00-22:00 h
Hluk z dopravy na hlavní pozemní komunikaci	60
Hluk z dopravy na místní komunikaci	55
Hluk z kolejové dopravy	55
Hluk ze stacionárních zdrojů hluku	50
<b>Hluk z hudební produkce</b>	<b>45</b>
Stará hluková zátěž z dopravy ve městě	70

Pro nejproblematictější měřené pásmo, ve výšce 14,5 m, jsem provedl grafický výpočet izofon, což jsou pásma znázorňující jednotlivé hladiny hluku na měřené situaci.



Obr. 56 Grafické znázornění pásem izofon [autor a Hluk+]



Obr. 57 Grafické znázornění hladin hluku na prostorovém modelu [autor a Hluk+]

Na obrázku jsou patrná jednotlivá barevná pásma hluku a pro větší představu o síle tohoto hluku, je modré pole rozčleněno po „vrstevnicích“ od kostela (zdroje) po její hranici 30 dB.

#### 4.6. Požárně bezpečnostní řešení

Požárně bezpečnostní řešení stavby jsem zpracoval na základě zadání semestrálního předmětu 2. ročníku navazujícího magisterského studia *CH02 - Vybrané stati z požární bezpečnosti staveb*.

Protože posuzovaný kostel je stavbou, která je před výstavbou a já jsem mezi podklady k tomuto projektu dostal i vypracované požárně bezpečnostní řešení, zpracoval jsem své zadání jako pohled na různé typy materiálů, které lze v těchto prostorech použít.

Požárně bezpečnostní řešení v rozsahu projektové dokumentace, není předmětem této diplomové práce.



## Základní údaje

**Název stavby:** Kostel Brno - Lesná

**Místo stavby:** ul. Nezvalova, 638 00 Brno

parc.č. 202/1, 202/73, 202/84, k.ú. Lesná

**Investor:** Římskokatolická farnost Brno-Lesná

Nezvalova 13, 638 00 Brno

IČO 736 33 364

Kostel má kruhový půdorys o poloměru 12,5 m.

Svislé nosné konstrukce jsou z cihelného zdiva v kombinaci s betonem, konstrukce kůrů uvnitř kostela jsou betonové.

Objekt je zastřešen střechou tvaru kupole, jejíž nosná část je tvořena betonovou skořepinou.

Požární bezpečnost navrhovaného objektu „Kostel Brno - Lesná“ bude řešena dle ČSN 730802:2009 a dle norem navazujících a souvisejících, v souladu s požadavky vyhl.č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb.

Jelikož se jedná o prostory, v nichž se budou shromažďovat lidé, objekt se musí řešit v souladu s normou ČSN 730831 – Shromažďovací prostory.

### 4.6.1. Požadavky na stavební konstrukce a materiály:

- **Střechy, stropy, podhledy**

Materiály použité na těchto konstrukcích nesmí při požáru odkapávat nebo odpadávat. Popřípadě musí být zajištěny tak, aby pád aj. neohrožovali lidi.

Konstrukce střechy je tvořena ŽB kupolí – nehrozí žádné nebezpečí

Pro potřeby akustiky, v podobě akustických podhledů, by mohly být použity materiály třídy reakce na oheň nejméně B-s1-d0,  $i_s=0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Při zajištění zkrápění SH2 nebo DH2 může být akustický podhled třídy až D-s2-d0,  $i_s=100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

- **Tepelné izolační vrstvy střešního pláště**

- Teplená izolace střešního pláště může být z výrobku třídy reakce na oheň A1 až B
- Mezi takové materiály se řadí:
  - Tepelná izolace z minerálních vláken např: Dekwool
  - Tepelná izolace z kamenných vláken např: Isover
  - Třída reakce na oheň těchto materiálů je A1 – nehořlavá
  - Při použití foukané izolace z rozvlákněného novinového papíru je zapotřebí, aby vrstva měla min. 100mm kdy je její třída reakce na oheň B-s2

Protože se střecha nachází ve výšce  $h > 12\text{m}$ , konkrétně 14,4m a výše, není možné použít polystyrenových materiálů.

- **Vnější tepelné izolace obvodových stěn**

Pro objekty s výškou  $h > 12\text{m}$  musí být třída reakce na oheň A1 nebo A2.

Materiály pro zateplení obvodového pláště jsou opět za potřeby z minerálních vláken nebo kamenná vlny.

Zateplení pomocí EPS nelze použít, protože jeho reakce na oheň je třídy E a není vhodný pro provětrávané fasády

- **Podlahové krytiny**

Pro podlahové krytiny shromažďovacích prostorů je nutné použití materiálů třídy reakce na oheň D<sub>fl-s1</sub>. Pro podlahy je vhodné použití kamenné dlažby.

- **Pevně zabudované lavice**

Lavice musí být z výrobků třídy reakce na oheň D (nesmí být na nich použity termoplasty). Použití desek z rostlého dřeva s min. objemovou hmotností  $400\text{ kg/m}^3$  a minimální tloušťka materiálu je 12mm.

- **Čalounické materiály a dekorace**

Nesmí být použito materiálů, u kterých by došlo ke vznícení do 20 vteřin.

Materiály musí z hlediska zápalnosti vyhovovat zkoušce podle ČSN EN 1021/2 – Hodnocení zápalnosti čalouněného nábytku.

#### **4.6.2. Únikové cesty:**

Ze shromažďovacího prostoru musí vést minimálně 2 únikové cesty, vedoucí různými směry.

Nejmenší šířka pro UC jsou 2 únikové pruhy (1 ú.p. je 550mm), optimum jsou 3-4 únikové pruhy, tzn. šířka UC cca 2m.

Dveře se musí otvírat otáčením křídel v postranních závěsech nebo v čepech ve směru úniku. Dveře musí být opatřeny panikovou funkcí.

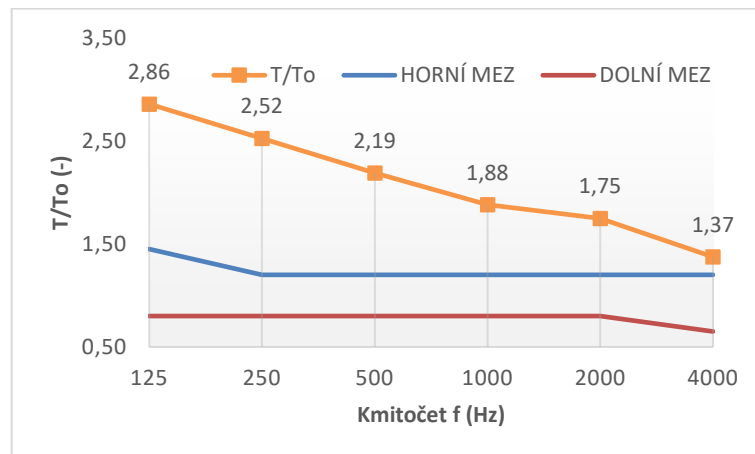
Paniková funkce je nadřazena z hlediska úniku nad požadavky bezpečnosti či vloupání. Dveře ale mohou být opatřeny prvky signalizujícími otevření nebo manipulaci.

## 5. Výsledky diplomové práce s uvedením zjištěných poznatků

### 5.1. Souhrn naměřených a vypočítaných hodnot doby dozvuku a jejich porovnání

Rekapitulace naměřených hodnot stávajícího stavu pomocí ručního výpočtu, viz *kap. 4.3*:

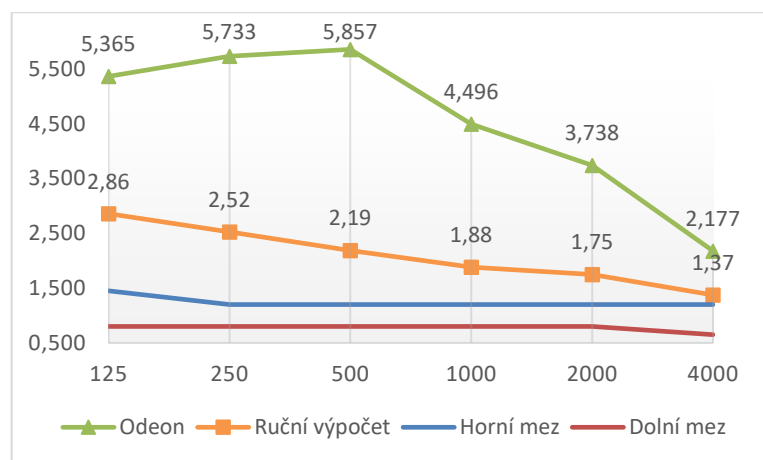
f (Hz)	T (s)	T <sub>0</sub> (s)	T/T <sub>0</sub> (-)	Mez	
				Horní	Dolní
125	3,76	1,315	2,86	1,45	0,80
250	3,32	1,315	2,52	1,20	0,80
500	2,88	1,315	2,19	1,20	0,80
1000	2,47	1,315	1,88	1,20	0,80
2000	2,30	1,315	1,75	1,20	0,80
4000	1,81	1,315	1,37	1,20	0,65



Tab. 18 a Graf 7 Průběh doby dozvuku  $T/T_0$  v závislosti na stanovených mezích [autor]

Tab. 19: Srovnání doby dozvuku původního stavu ručním výpočtem a simulací [autor]

f (Hz)	T <sub>0</sub> (s)	Ruční výpočet		Odeon - průměrné hodnoty		Meze	
		T (s)	T/T <sub>0</sub>	T (s)	T/T <sub>0</sub>	Horní	Dolní
125	1,315	3,76	2,86	5,37	4,08	1,45	0,80
250	1,315	3,32	2,52	5,73	4,36	1,20	0,80
500	1,315	2,88	2,19	5,86	4,45	1,20	0,80
1000	1,315	2,47	1,88	4,50	3,42	1,20	0,80
2000	1,315	2,30	1,75	3,74	2,84	1,20	0,80
4000	1,315	1,81	1,37	2,18	1,66	1,20	0,65



Graf 8 Srovnání doby dozvuku původního stavu ručním výpočtem a simulací [autor]

Tab. 20: Vypočítané a nasimulované hodnoty doby dozvuku T (s) pro navržený stav [autor]

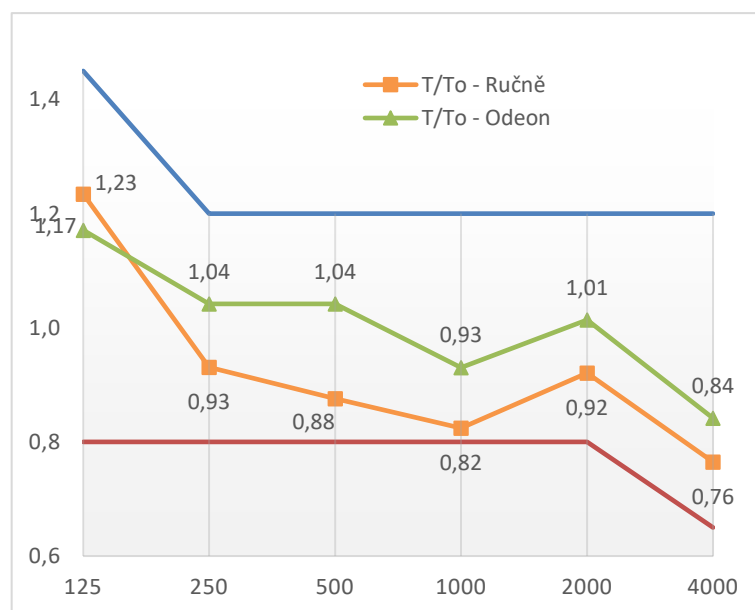
Doba dozvuku T (s) - návrh							
	Zdroj	Frekvence (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Ruční výpočet		1,62	1,22	1,15	1,08	1,21	1,01
Odeon	Z1	1,51	1,31	1,29	1,20	1,33	1,10
	Z2	1,51	1,32	1,39	1,35	1,38	1,10
	Z3	1,60	1,48	1,43	1,12	1,29	1,12
	Průměr	1,54	1,37	1,37	1,22	1,33	1,11
Rozdíl		-0,08	0,15	0,22	0,14	0,12	0,10

- **Porovnání s platnou legislativou**

Kmitočtový průběh doby dozvuku  $T$  (s) se prověřuje pomocí optimální doby dozvuku  $T_0$  (s). Kmitočtová závislost přípustného rozmezí je dána poměrem obou hodnot  $T/T_0$ .

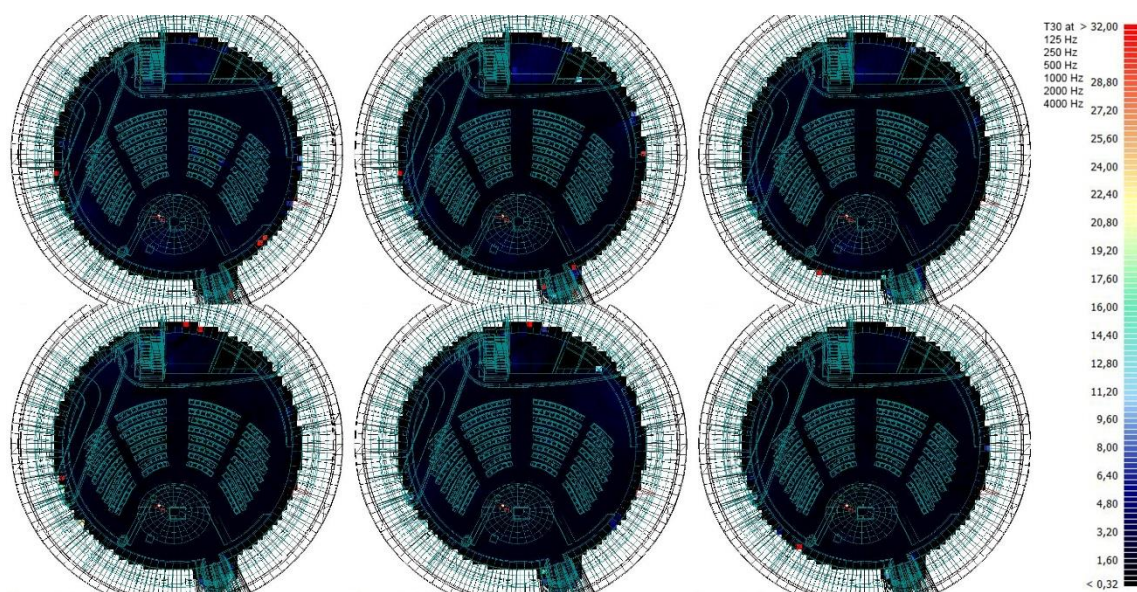
Tab. 21: Poměr vypočítané a nasimulované doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_0$  (s) pro navržený stav [autor]

f (Hz)	$T_0$ (s)	Ruční výpočet		Odeon - průměrné hodnoty		Meze	
		T (s)	$T/T_0$	T (s)	$T/T_0$	Horní	Dolní
125	1,315	1,62	1,23	1,54	1,17	1,45	0,80
250	1,315	1,22	0,93	1,37	1,04	1,20	0,80
500	1,315	1,15	0,88	1,37	1,04	1,20	0,80
1000	1,315	1,08	0,82	1,22	0,93	1,20	0,80
2000	1,315	1,21	0,92	1,33	1,01	1,20	0,80
4000	1,315	1,01	0,76	1,11	0,84	1,20	0,65

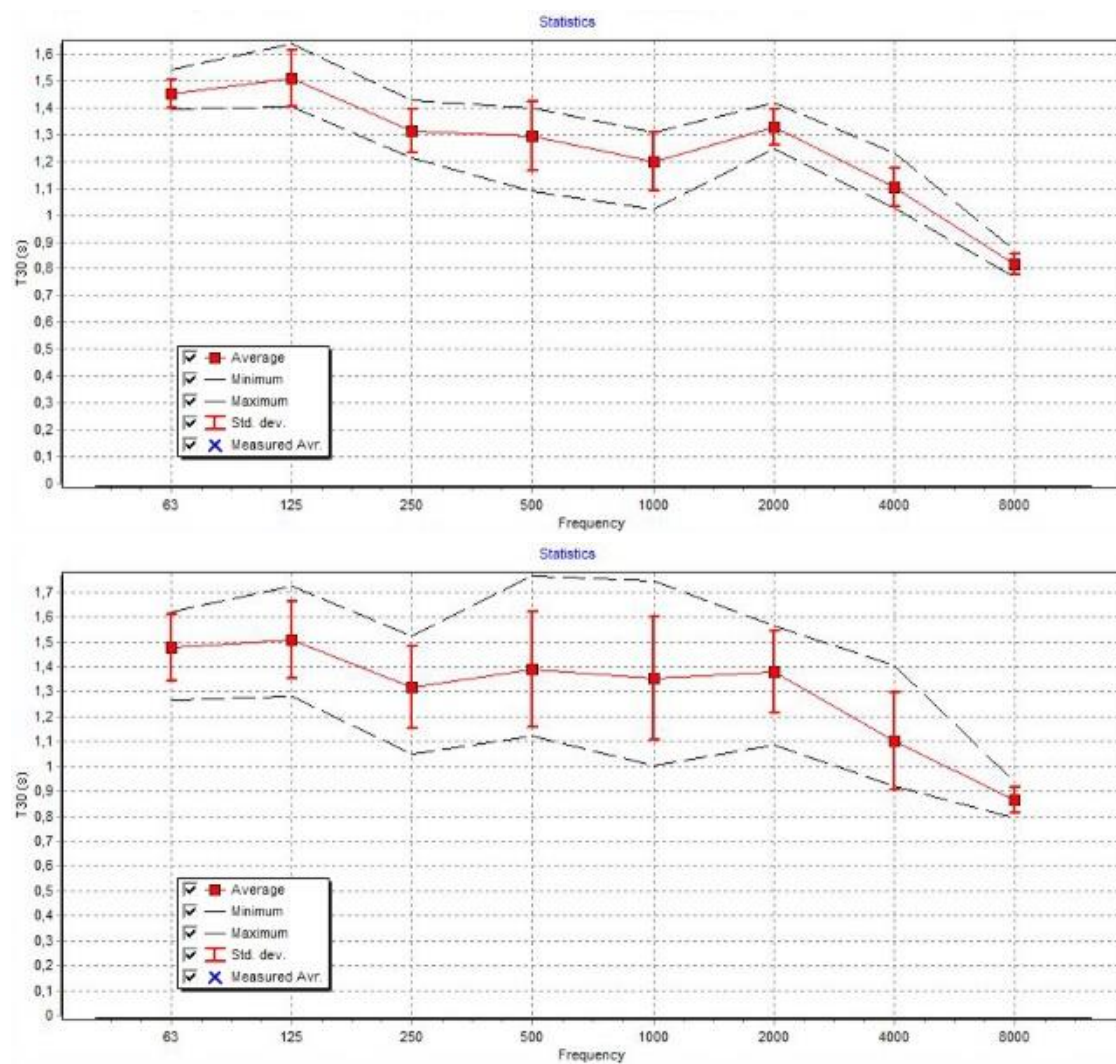


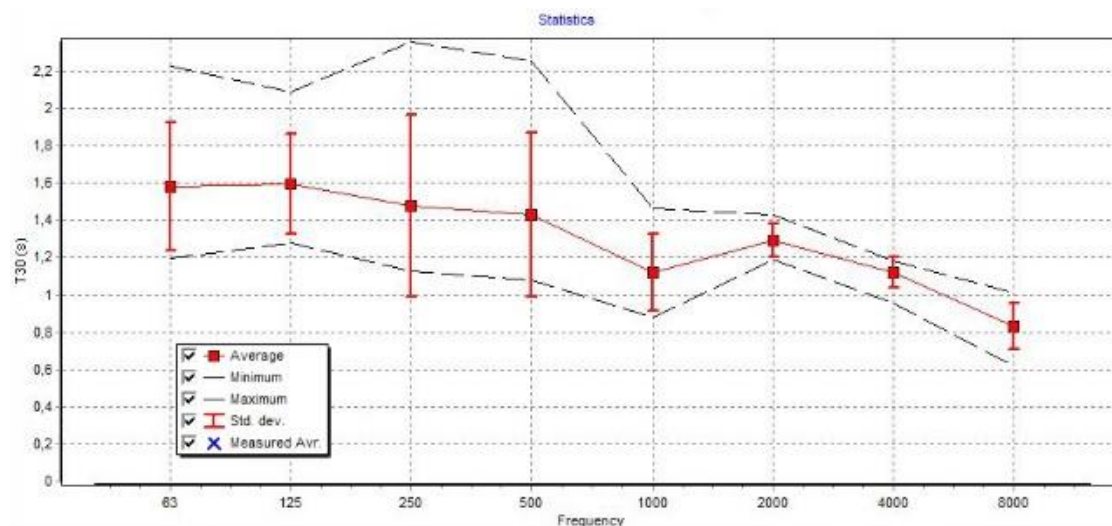
Graf 9 Porovnání poměru vypočítané a nasimulované doby dozvuku  $T$  (s) a optimální doby dozvuku  $T_0$  (s) [autor]

Jak je z grafického znázornění patrné, průběh doby dozvuku pomocí statistického výpočtu i pomocí simulace v programu Odeon Room Acoustics mají velmi podobný průběh a splňují legislativní akustické požadavky dle [5].



Obr. 58 Rozložení doby dozvuku  $T_{30}$  (s) v poslechové ploše na jednotlivých kmitočtech (125-4000 Hz) [autor a 12]





Obr. 59, 60 a 61 Průměrné, minimální a maximální hodnoty a standardní rozptyl doby dozvuku  $T_{30}$  (s) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1, Z2 a Z3 [autor a 12]

Na obr. 58 je vidět rozložení doby dozvuku  $T$  (s) v ploše kostela, jejíž hodnoty jsou spočítány pomocí simulace v tabulce 21. Vizuální pohled na kostel nám ukazuje, že doba dozvuku je poměrně rovnoměrně rozložena v celé své ploše.

## 5.2. Ostatní sledované parametry počítačové simulace Odeon Room Acoustics Program

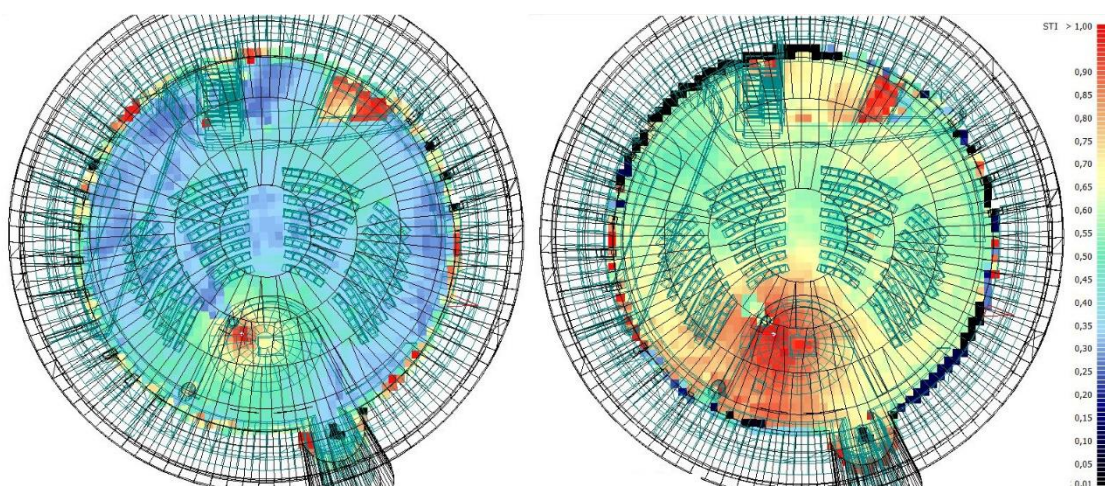
Mezi další sledovaná kritéria, která lze z programu Odeon získat pro zhodnocení této práce jsou již výše zmíněný index srozumitelnosti  $I$  (-), hladina akustického tlaku SPL (dB), počáteční doba dozvuku EDT (s) a míra jasnosti C80 (dB).

Aby bylo možné získat tyto parametry, byl pro ně použit výpočet na základě síťové odezvy *Grid Response* a odezva v definovaných přijímačích *Point Response*. Více o těchto metodách se lze dočíst v kapitole 2.9.7.

Všechna grafická znázornění budou zobrazovat sledovaná kritéria pro zdroj Z1, pokud nebude uvedeno jinak.



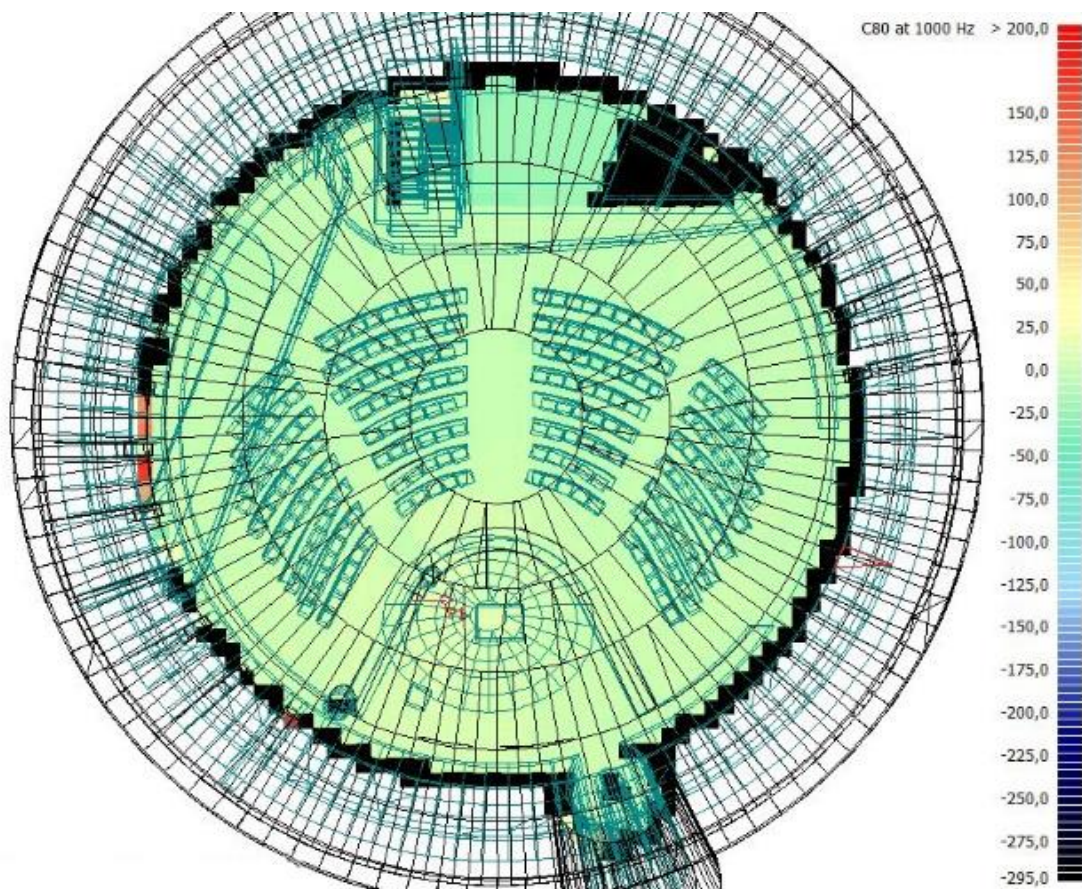
- **Index srozumitelnosti I (STI – Speech Transmission Index)**



Obr. 62 Porovnání indexu srozumitelnosti I (-) původního a navrženého stavu [autor a 12]

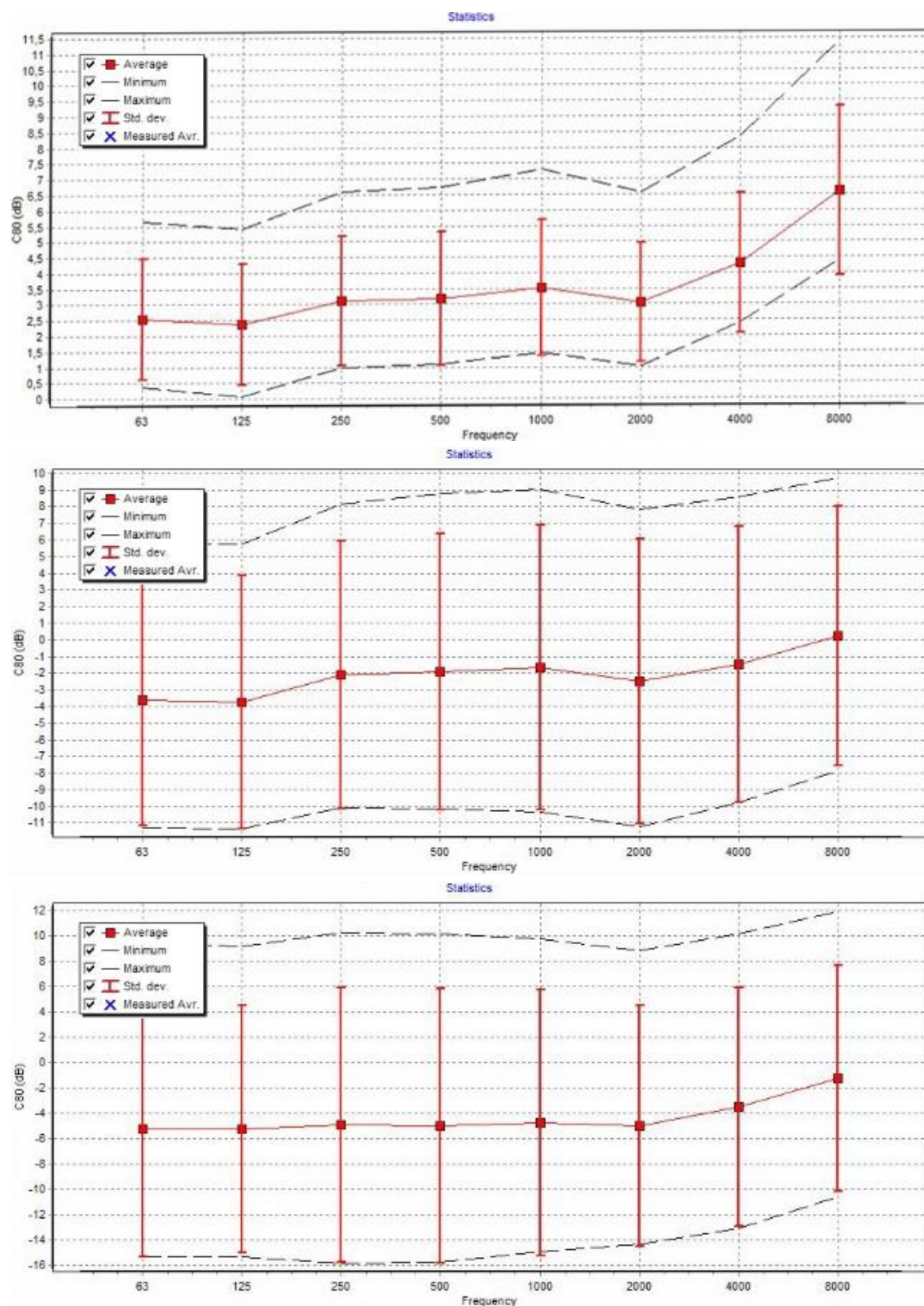
Z přiloženého obrázku je vidět velmi patrný rozdíl ve srozumitelnosti kostela bez úprav a s navrženými akustickými opatřeními. Prostor kostela se nyní příjemně zaplnil kvalitnějším zvukem, který bude mít příznivý dopad pro posluchače.

- **Míra jasnosti C80:**



Obr. 63 Průběh míry jasnosti C80 (dB) na 1000 Hz v ploše kostela [autor a 12]



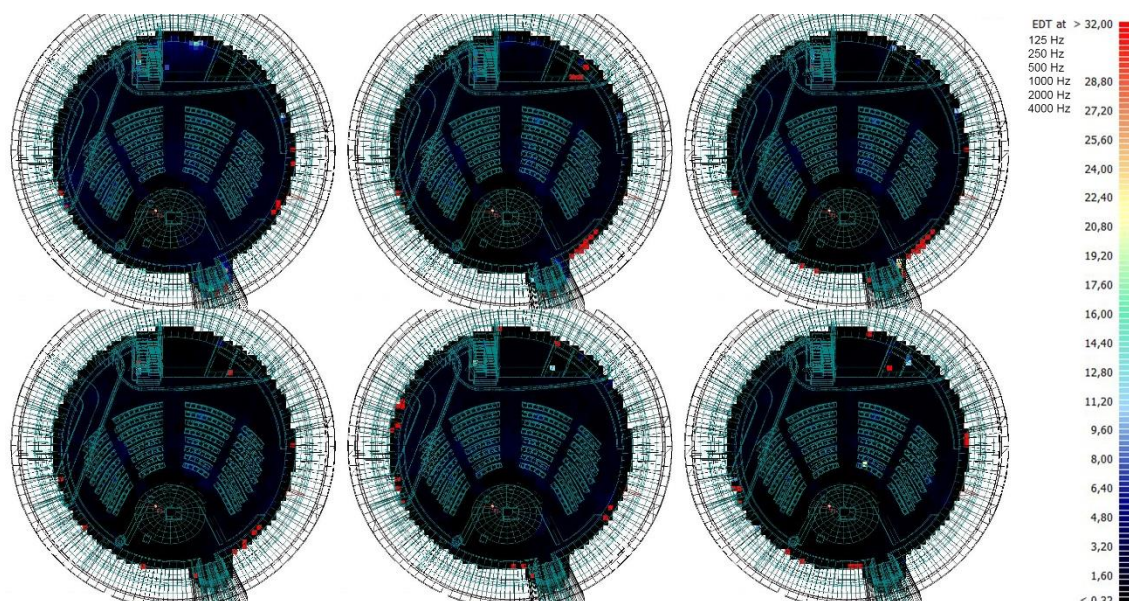


Obr. 64, 65 a 66 Průměrné, minimální a maximální hodnoty a standardní rozptyl míry jasnosti C80 (dB) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1, Z2 a Z3 [autor a 12]

Jak je patrné z *obrázku 63* pro hodnotu míry jasnosti, je rovnoměrně rozložena po celé poslechové ploše a její rozptyl se pohybuje do 4 dB, ostatně to dokládají statistiky grafického znázornění míry jasnosti na *obr. 64, 65 a 66*.

Podle [7] je optimální rozmezí  $1 \pm 2$  dB, což všechny tři zdroje zvuku splňují a žádný z nich nevykazuje velké rozdíly na jednotlivých frekvencích.

- **Počáteční doba dozvuku EDT (Early Decay Time):**

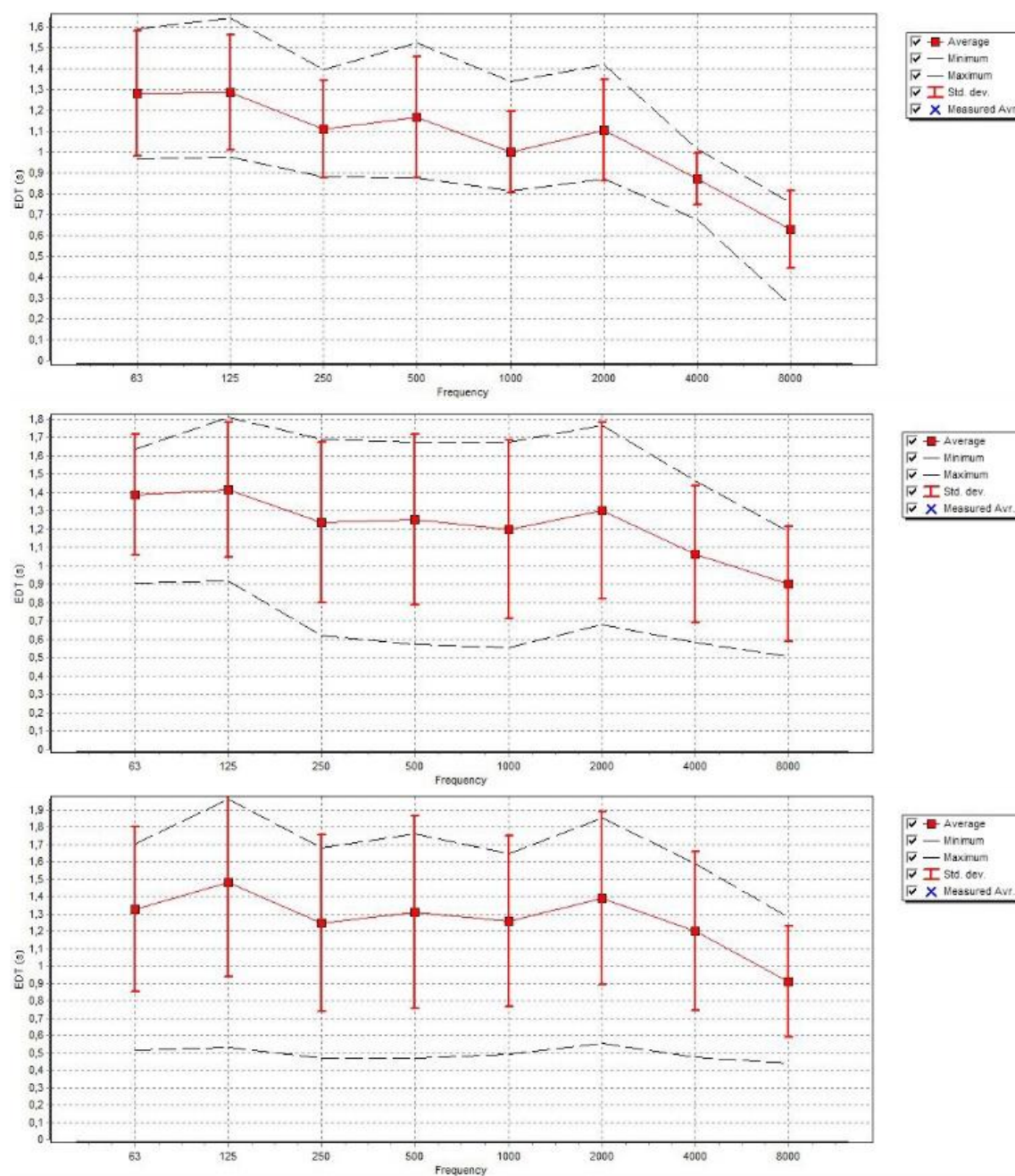


*Obr. 67 Rozložení počáteční doby dozvuku EDT (dB) v poslechové ploše na jednotlivých kmitočtech (125-4000 Hz) [autor a 12]*

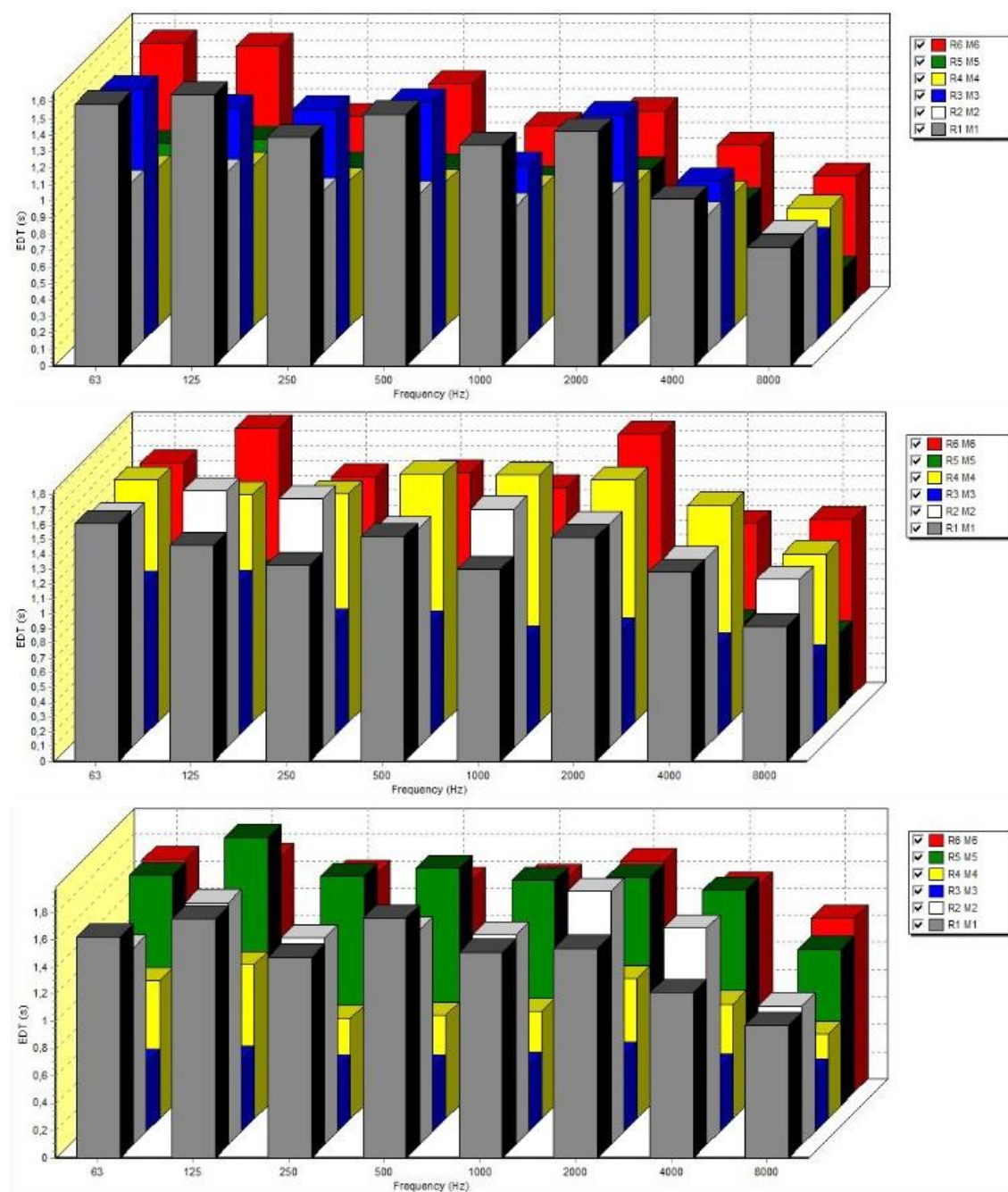
Veličina EDT má lepší souvislost s vnímaným dozvukem daného prostoru, zatímco doba dozvuku T se týká spíše fyzikálních vlastností prostoru.

Kvůli chybovým plochám na kraji modelu, kde hodnoty EDT dosahují více než 32 dB je spektrum příliš roztažené a tak nejsou vidět jemnější rozdíly EDT v daném prostoru.





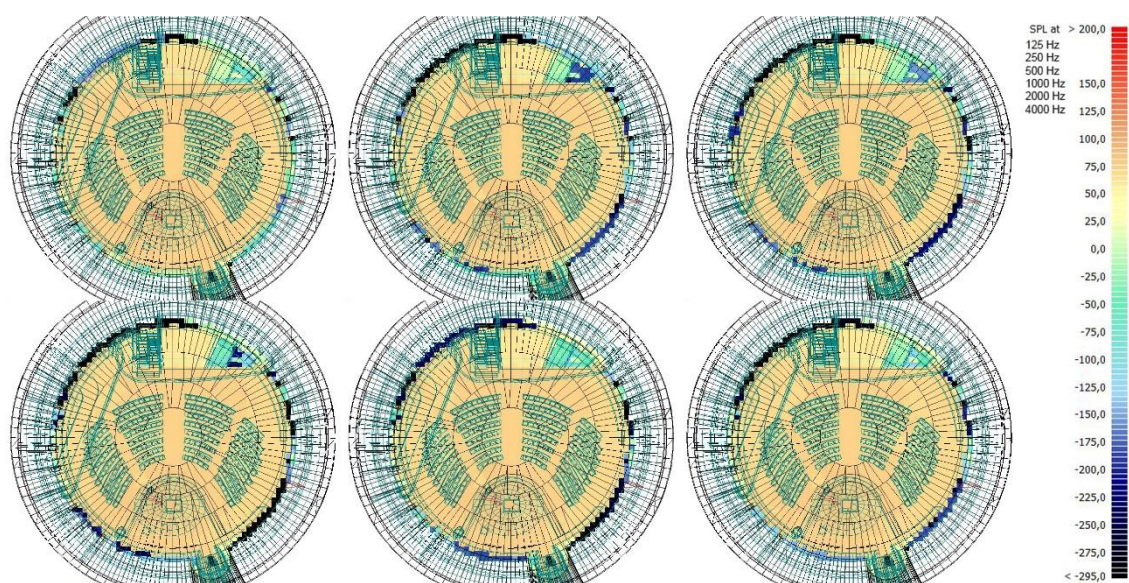
Obr. 68, 69 a 70 Průměrné, minimální a maximální hodnoty a standardní rozptyl počáteční doby dozvuku EDT (dB) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1, Z2 a Z3 [autor a 12]



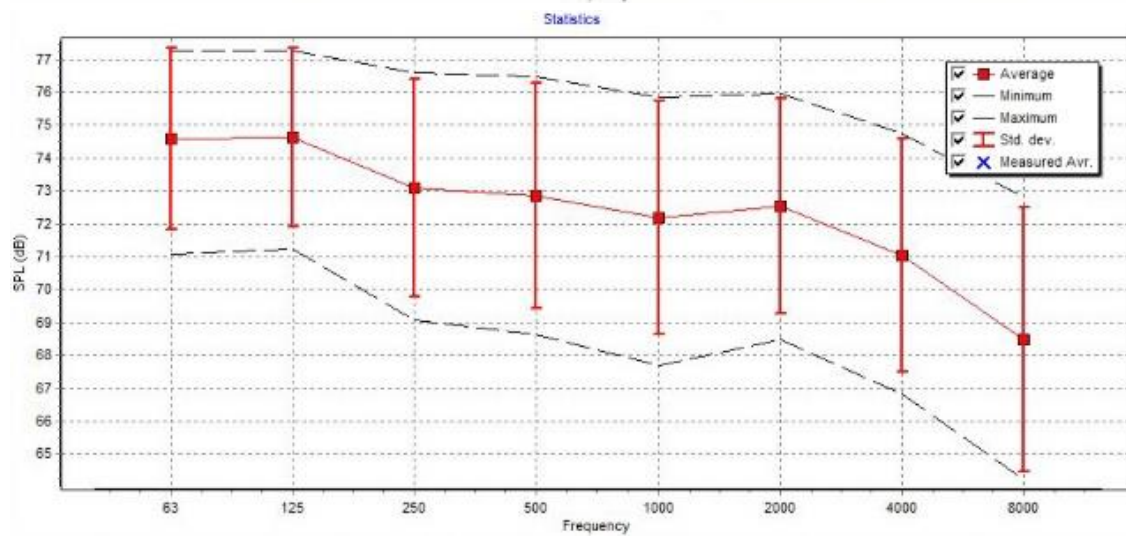
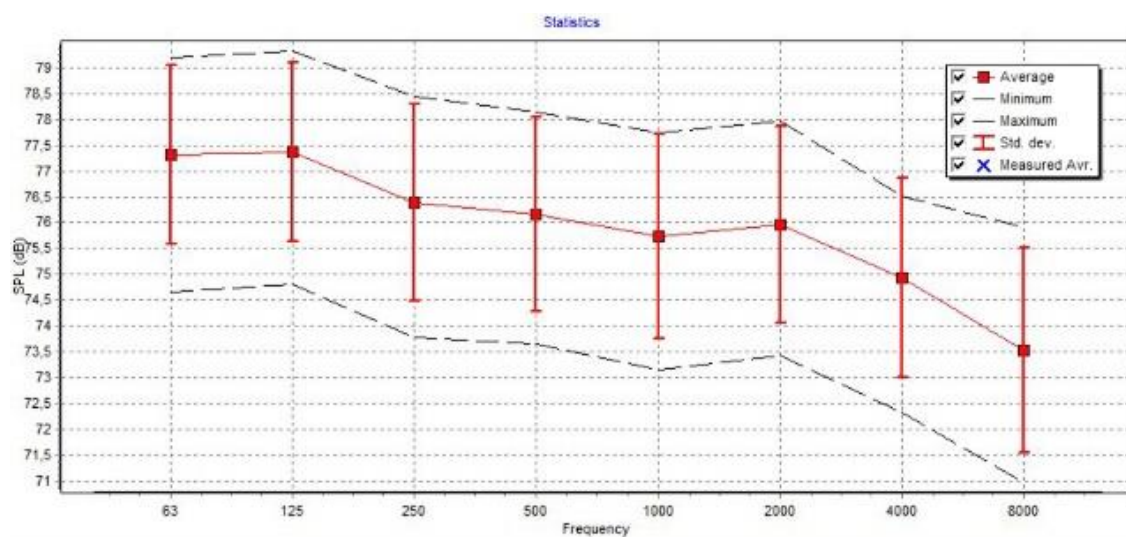
Obr. 71, 72 a 73 Grafické znázornění počáteční doby dozvuku EDT (dB) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1-Z3 a jednotlivé mikrofonní místa M1-M6 [autor a 12]

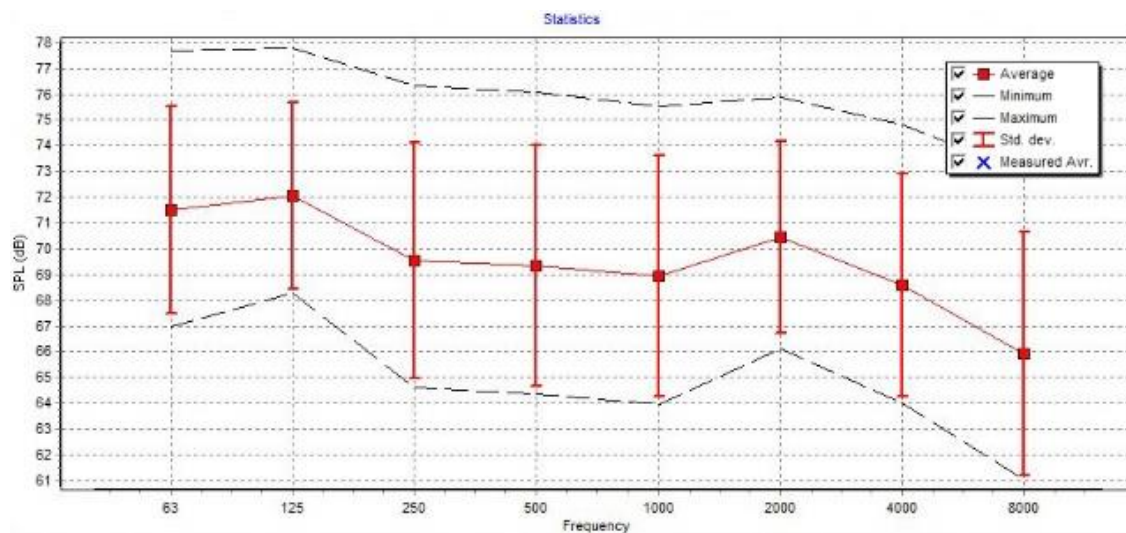


- Hladina akustického tlaku SPL (Sound Pressure Level):**



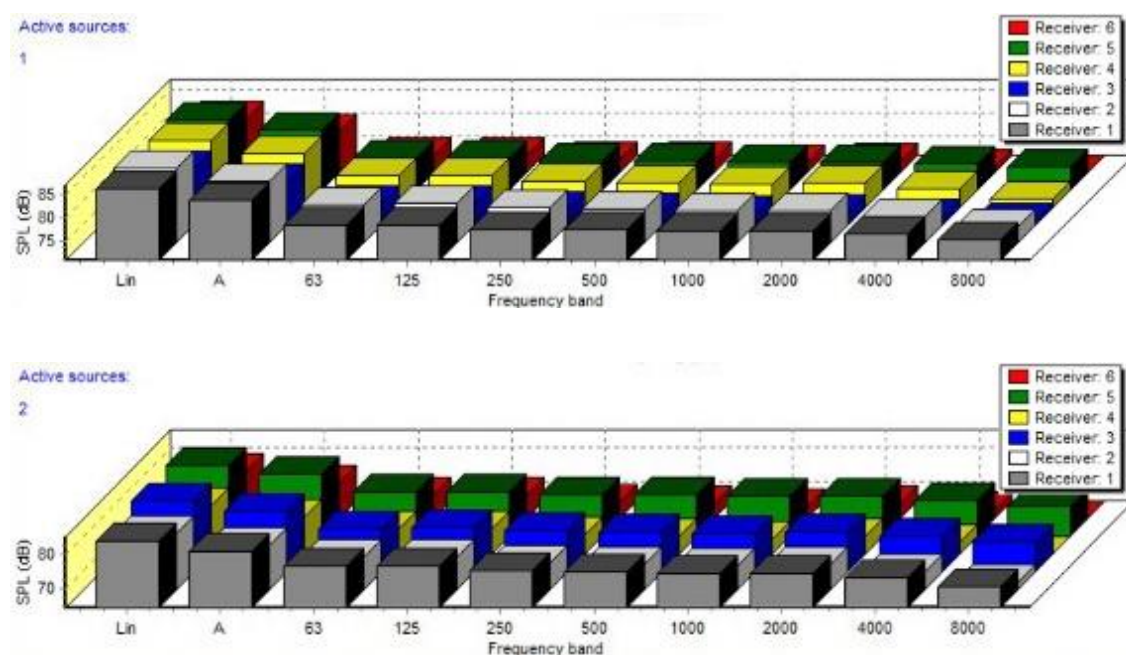
Obr. 74 Hodnoty hladiny akustického tlaku SPL (dB) v poslechové ploše na jednotlivých kmitočtech (125-4000 Hz) [autor a 12]

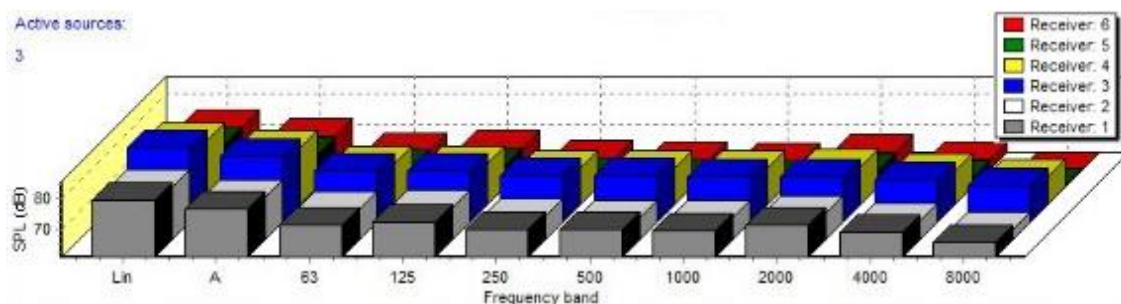




Obr. 75, 76 a 77 Průměrné, minimální a maximální hodnoty a standardní rozptyl • hladiny akustického tlaku SPL (dB) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1, Z2 a Z3 [autor a 12]

Jak je patrné z přiložených statistických údajů, hladina akustického tlaku je na všech sledovaných kmitočtech více méně rovnoměrně rozložena a nabývá hodnot od 66 dB do 77,5 dB. Co se rozptylu týče, jeho rozpětí je na každé frekvenci  $\pm 10$  dB.





Obr. 78, 79 a 80 Grafické znázornění hladiny akustického tlaku SPL (dB) na jednotlivých kmitočtech pro zdroje Z1-Z3 a jednotlivé mikrofonní místa M1-M6 [autor a 12]

Z výše uvedeného je zřejmé, že hodnoty SPL (dB) na jednotlivých kmitočtech jsou rozloženy poměrně rovnoměrně v celé své ploše a nabývají hodnot kolem 72 dB.

Z toho vyplývá, že hlasitost je přibližně rovnoměrná po celé poslechové ploše a tak se ke každému dostane stejné síly zvukového signálu.

Všechny výsledky je možné si prohlédnout v příloze B.1 - *Odeon Room Acoustics*.



## 6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout vhodná akustická opatření pro zlepšení poslechových a akustických vlastností kostela. Na základě vypočítané doby dozvuku v aplikaci MS Excel jsem provedl prvotní návrh těchto akustických opatření a s těmito poznatky jsem vytvořil 3D model kostela, který jsem následně posoudil ve specializovaném programu Odeon Room Acoustics, kde jsem opět na původním stavu kostela spočítal dobu dozvuku a pomocí těchto zjištěných poznatků jsem mohl provést následná opatření.

Dále bylo cílem vytvořit hlukovou studii v programu Hluk+, abych zjistil, jaký dopad mají zvony kostelní věže a bohoslužba v kostele na stávající okolní zástavbu.

Návrh byl tedy proveden dvěma metodami. První z nich byl ruční výpočet statistickou metodou a druhý v programu Odeon.

Návrh jsem provedl dle platných pokynů a požadavků příslušné platné legislativy, tak aby bylo dosaženo co nejoptimálnějších sledovaných kritérií. Při návrhu byly zohledněny požadavky akustické, požárně bezpečnostní, jak vyplývá z kap. 4.6 a vzhledem ke kulturnímu rázu objektu taky na estetické.

Jelikož je akustika složitý vědní obor a jediným hodnotícím kritériem není doba dozvuku, sledoval jsem vzhledem k účelu budovy hned několik kritérií. Cílem bylo dosáhnout co nejoptimálnějších hodnot všech sledovaných akustických parametrů.

Návrh akustiky byl proveden dvěma samostatnými metodami, jejichž výsledky se ne zcela shodovaly. Bylo použito rozdílné množství akustických obkladů, nejde tedy s přesností určit, která z těchto dvou metod je správnější. Příčinou může být nekompletní načtení modelu v programu *Odeon Room Acoustics Program*.

Pokud se ale obrátím na výsledné hodnoty a porovnání s platnou legislativou, dá se konstatovat, že na posuzovaném modelu se mi podařilo zlepšit akustické vlastnosti a celkovou poslechovou kvalitu tohoto kostela pro poslech hudby a mluveného slova.

Závěrem posouzení akustických vlastností dle platné legislativy kostela, je zlepšení poslechových vlastností vedoucí k mnohem příjemnějšímu využívání těchto prostor.

Díky hlukové studii okolní zástavby kostela jsem zjistil, že jeho výstavba nebude mít tak velký vliv na obyvatele městské části Brno-Lesná. V několika pásmech hodnota akustického tlaku přesáhla povolený hygienický limit o maximálně 3,1 dB.

## 7. Seznam použité literatury

- [1] Vaverka, J., Kozel, V., Ládyš, L., Liberko, M., Chybík, J. *Stavební fyzika I - urbanistická, stavební a prostorová akustika*. Nakladatelství VUTIUM, Brno, 1998
- [2] Janoušek, I. *ABC – akustiky pro hudební praxi*. Editio Supraphon Praha, 1979
- [3] Kočí, Ilona a Ivan, *Akustika – konstrukce stavebního truhlářství*, VOŠ Volyně, 1997
- [4] Domkář, Vít, *Akustika - Vybrané kapitoly pro architekty a designéry*, ČVUT
- [5] ČSN 73 0527 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely*. ČNI Praha, 2005
- [6] Donaťáková, Dagmar. *Stavební akustika a denní osvětlení*. VUT, Brno, 2010
- [7] ČSN 73 0525 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. ČNI Praha, 1998
- [8] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1 : Prostory pro přednes hudby a řeči*. ČNI Praha, 2009
- [9] ČSN EN 12354-6:2004 *Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků*. ČNI Praha, 2004
- [10] Dostál, Miroslav, *Akustika hudebního klubu: diplomová práce*, VUT, Brno, 2014
- [11] ODEON Room Acoustics Program, Version 8,5, *User Manual*
- [12] ODEON Room Acoustics Program
- [13] ODEON [on-line], Dostupné z: [www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)
- [14] Prof. Ing. JIŘÍ VAVERKA, DrSc.. Archiweb. [www.archiweb.cz](http://www.archiweb.cz): *Akustika sakrálních prostorů*. [online]. 22. 11. 2005 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.archiweb.cz/salon.php?type=10&action=show&id=471>
- [15] ČSN EN ISO 3382-2 *Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. ČNI Praha, 2009

- [16] Rigips. *Akustika a design v interiéru*. [online]. [2010] [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://www.rigips.cz/files/akustika-a-design-podhledy/Akustick%C3%BD-sv%C4%9B%C5%A1en%C3%BD-podhled-z-deseek-Rigiton\\_4.07.18-4.07.29.pdf](http://www.rigips.cz/files/akustika-a-design-podhledy/Akustick%C3%BD-sv%C4%9B%C5%A1en%C3%BD-podhled-z-deseek-Rigiton_4.07.18-4.07.29.pdf)
- [17] Ecophon. *Hygiene LabotecAir™ A*. [online]. 18. 10. 2016 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.ecophon.com/PIM/Hygiene%20LabotecAir%20A%20C1-PRODUCT-UK.pdf>

## 8. Seznam použitých zkratek a symbolů

EPS	expandovaný polystyrén
NP	nadzemní podlaží
ÚC	úniková cesta
SDK	sádrokartonové desky
SPB	stupeň požární bezpečnosti
TI	tepelná izolace
UT	upravený terén
PP	pracovní plocha
XPS	extrudovaný polystyrén
T30	doba dozvuku
EDT	počáteční doba dozvuku
STI	index srozumitelnosti
C80	míra jasnosti
$T_o$	optimální doba dozvuku
$\alpha_i$	činitel zvukové pohltivosti
$A_i$	ekvivalentní pohltivá plocha
SPL	hladina akustického tlaku
f	frekvence, kmitočet

## 9. Seznam příloh

<b>A - PŘÍPRAVNÉ A STUDIJNÍ PRÁCE</b>	
A.01 - Studie odvodnění střechy	2
A.02 - Skladba ploché nepochozí střechy s klas. pořadím vrstev	1
A.03 - Skladba ploché pochozí střechy s klas. pořadím vrstev	1
A.04 - Skladba dvouplášťové střechy	2
A.05 - Studie - Půdorys 1PP	6
A.06 - Studie - Půdorys 1NP	6
A.07 - Studie - Řez A-A	8
A.08 - Pohled severovýchodní	3
A.09 - Pohled jihovýchodní	8
	<b>37</b>
<b>B – VÝPOČTY</b>	
B.1 - Odeon Room Acoustics	
Zdroj Z1	5
Zdroj Z2	5
Zdroj Z3	5
B.2 - HLUK+	
Protokol a výpočty	7
	<b>22</b>
<b>C – STAVEBNÍ FYZIKA</b>	
C.1 – Teplo	10
C.2 – Ztráty	2
C.3 – Stabilita	7
	<b>19</b>
<b>D - ARCHITEKTONICKO-STAVEBNÍ ŘEŠENÍ</b>	
D.01 - Půdorys jednoplášťové ploché střechy	6
D.02 - Výkres horního a dolního pláště dvouplášťové střechy	8
D.03 - Detail vtoku	2
D.04 - Detail zaatikového žlabu střešního pláště	6
D.05 - Detail ukotvení oken	2
	<b>24</b>
<b>CELKEM</b>	<b>102</b>